

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Automação de Bancada para Ensaio de
Descargas Parciais em Estatores de
Hidrogeradores

Mateus Gabriel Santos

Itajubá, 3 de julho de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Mateus Gabriel Santos

**Automação de Bancada para Ensaio de
Descargas Parciais em Estatores de
Hidrogeradores**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Eléctricos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos

Coorientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

3 de julho de 2018

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Automação de Bancada para Ensaios de
Descargas Parciais em Estatores de
Hidrogeradores

Mateus Gabriel Santos

Dissertação aprovada por banca examinadora em
03 de Julho de 2018, conferindo ao autor o título de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Sousa Bastos (Orientador)
Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni (Coorientador)
Prof. Dr. Luiz Lenarth Gabriel Vermaas
Prof. Dr. Yvo Marcelo Chiaradia Masselli

Itajubá
2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus familiares, pelo apoio e incentivo recebidos, para que continuasse evoluindo pessoal, profissional e intelectualmente, em especial aos meus pais e irmão, pois só foi possível chegar até aqui graças a educação e suporte que me deram.

Aos meus orientadores Guilherme Sousa Bastos e Edson da Costa Bortoni, pelos conselhos e ensinamentos fundamentais ao longo do caminho e para a conclusão do trabalho. À toda equipe do LAT, em especial ao Professor Credson, e aos técnicos: João, Nivaldo e Cleython, pelo auxílio durante a instalação da bancada e realização dos ensaios. Aos colegas do projeto José Renato, cujo suporte na infraestrutura de rede e sua configuração foi fundamental, e José Vitor pela ajuda nas questões diversas sobre o ensaio.

À CEMIG, pelo financiamento da pesquisa e cessão das barras para ensaio, em especial ao Engenheiro responsável pelo projeto, Gerson Braulio, pelos seus insights e contribuições quanto a adequação das condições dos ensaios àquelas encontradas nas usinas. E a OSIssoft pelo suporte e parceria em relação ao PI System.

Finalmente, agradeço também aos meus irmãos de coração da República Confraria, que com sua amizade e companheirismo tornaram mais leves os momentos de dificuldade, e a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

*"Nem tudo que conta pode ser contado, e nem tudo que pode ser contado conta."
(William Bruce Cameron)*

Resumo

Este trabalho é relacionado ao projeto de pesquisa "Proposta de uma abordagem para diagnóstico e avaliação de vida útil de geradores" desenvolvido pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em parceria com a CEMIG, e apresenta o projeto e desenvolvimento de automação de uma bancada de ensaios do Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI, para ser utilizada em testes de descargas parciais em estatores de hidrogeradores, visando permitir a realização de ensaios que simulem o envelhecimento dos estatores com o monitoramento da evolução das descargas parciais por toda a duração dos ensaios.

Diversos equipamentos e dispositivos foram incorporados à bancada para o monitoramento e operação automatizada da bancada. A integração dos dispositivos é feita através do uso do PI System, um dos mais conceituados softwares de PIMS, que executa a coleta e gerenciamento dos dados e um CLP que comanda a operação do ensaio.

Foram realizados os ensaios de envelhecimento: 1000 horas com tensão aplicada, com tensões de 1pu e 2pu, ensaio de ciclos térmicos com tensão aplicada, com as tensões de 1pu e 1,25pu e o teste de resistência a tensão. Os resultados são analisados usando ferramentas do PI System (PI), e então discutidos.

A bancada atende aos objetivos propostos possibilitando a realização dos ensaios de forma automatizada, com necessidade pequena de interferências de operadores - restrita apenas para correção de eventuais falhas que são prontamente identificadas e notificadas à equipe através do sistema de monitoramento. Os dados são armazenados pelo PI formando um repositório que permite à equipe do projeto realizar análise detalhada dos dados de diferentes ensaios.

Palavras-chaves: Automação, Bancada de ensaios, Descargas Parciais, Testes de diagnóstico, Hidrogeradores.

Abstract

This work is related to the research project called "Proposal for an approach for diagnosis and evaluation of generator remaining life" taking place at UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) in a partnership effort with CEMIG, and presents the project and development of an automated test bench for partial discharge testings of hydrogenerator stators at LAT-EFEI (High Voltage Laboratory at UNIFEI). Those tests intend to simulate the aging of stators while the partial discharge behavior is monitored through all of its duration.

Several equipment and devices are installed in the testbench in order to allow its monitoring and automated operation. Their integration is done using the PI System, one of the major PIMS software in the market, that collects and manages all the data from the testbench's devices and a PLC that commands the test operation.

These aging tests were realized: Partial Discharge Tests with 1pu and 2pu voltages, Thermal Cycling tests with applied voltage using 1pu and 1,25pu voltages and also the voltage endurance test. The results were analyzed using PI System Tools and then discussed.

The testbench meets the proposed objectives allowing the automated testing, with little to no operator interference - restricted only to rectify potential failures that are promptly identified and reported to the team by the monitoring system. The PI System stores the data of all equipment and devices during the tests, allowing the team to perform detailed analysis of that data.

Key-words:Automation, Testbench, Partial Discharges, Diagnostic tests, hydrogenerators.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Frame de comunicação Modbus, Organization (2018) | 26 |
| Figura 2 – A pirâmide de automação | 27 |
| Figura 3 – Modelo hierárquico para a pirâmide de automação, adaptado de ISA (2010) | 28 |
| Figura 4 – Estrutura geral do PI de acordo com OSIsoft (2016) | 29 |
| Figura 5 – Modelo genérico de arquitetura de instalação do PI System, de acordo com OSIsoft (2016) | 30 |
| Figura 6 – Arquitetura da Instalação do PI na UNIFEI | 32 |
| Figura 7 – Esquemático da bancada | 33 |
| Figura 8 – Fonte de Tensão | 34 |
| Figura 9 – Painel de comando da fonte de tensão | 34 |
| Figura 10 – Circuito de alimentação | 35 |
| Figura 11 – VARIAC utilizado para a indução de corrente | 35 |
| Figura 12 – Circuito de indutores e cabo isolado | 36 |
| Figura 13 – Sistema de resfriamento | 36 |
| Figura 14 – Medidor de descargas parciais instalado na bancada | 37 |
| Figura 15 – Capacitor de acoplamento do medidor de descargas parciais | 37 |
| Figura 16 – Calibrador do medidor de descargas parciais conectado ao capacitor de acoplamento | 38 |
| Figura 17 – Tela principal de interface do Software DDX 9112b | 38 |
| Figura 18 – Esquemático do circuito de retificação | 40 |
| Figura 19 – Transformador de corrente - relação 2500:5 - instalado no cabo de alimentação de corrente | 41 |
| Figura 20 – Transdutor de corrente - entrada 0 a 5A; saída 4 a 20mA | 42 |
| Figura 21 – Modelo de Fieldlogger utilizado na bancada | 43 |
| Figura 22 – Câmera termográfica AX8 da FLIR | 44 |
| Figura 23 – Foto capturada pela câmera termográfica | 45 |
| Figura 24 – Termohigrômetro modelo T3511 da Comet Sensors | 47 |
| Figura 25 – Módulo XC136 da Exsto - CLP Siemens S7-1200 com algumas das ligações para os ensaios | 48 |
| Figura 26 – Interface IHM desenvolvida para o ensaio de ciclos térmicos | 48 |
| Figura 27 – Circuito desenvolvido para o acionamento dos sistemas de indução de corrente e refrigeração | 49 |
| Figura 28 – Configuração de Scan classes da interface Modbus ReadWrite | 52 |
| Figura 29 – Aplicativo para criação e edição do arquivo de configuração da Interface Modbus ReadOnly | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Configuração de serviço da interface UFL para o medidor de descargas parciais | 53 |
| Figura 31 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "General" | 55 |
| Figura 32 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "Archive" | 56 |
| Figura 33 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "Classic" | 57 |
| Figura 34 – Árvore AF para a bancada criada no PI System Explorer | 58 |
| Figura 35 – Atributos criados para o Fieldlogger | 58 |
| Figura 36 – Atributos do termohigrômetro organizados por categorias | 59 |
| Figura 37 – Configuração da análise de geração dos EFs de monitoramento de aquecimento | 60 |
| Figura 38 – Temperatura medida pelo termopar 1 durante um ciclo de aquecimento e resfriamento | 65 |
| Figura 39 – Temperaturas medidas pelos termopares durante um ciclo de aquecimento e resfriamento | 65 |
| Figura 40 – Temperaturas máximas medidas pelos boxes das câmeras durante um ciclo de aquecimento e resfriamento | 65 |
| Figura 41 – Comparação entre as médias de temperatura medidas via termopar e câmera e o delta entre elas | 66 |
| Figura 42 – Esquemático do circuito para monitoramento do ensaio de resistência a tensão | 69 |
| Figura 43 – Tela IHM para o monitoramento do ensaio de ciclos térmicos com quadro de status do ensaio de resistência a tensão | 69 |
| Figura 44 – Ensaio de 1000h a 1pu - Intensidade das descargas parciais divididas por semiciclos positivos e negativos | 71 |
| Figura 45 – Ensaio de 1000h a 1pu - Análise de tendência de +QM via média móvel com janela = 25 | 71 |
| Figura 46 – Ensaio de 1000h a 1pu - Análise de tendência de -QM via média móvel com janela = 25 | 72 |
| Figura 47 – Ensaio de 1000h a 2pu - Intensidade das descargas parciais divididas por semiciclos positivos e negativos | 72 |
| Figura 48 – Ensaio de 1000h a 2pu - Análise de tendência de +QM via média móvel com janela = 25 | 73 |
| Figura 49 – Ensaio de 1000h a 2pu - Análise de tendência de -QM via média móvel com janela = 25 | 73 |
| Figura 50 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras originais de Qm | 75 |
| Figura 51 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de “Qm” com substituição de valores anômalos por -1" | 75 |
| Figura 52 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de “Qm” com substituição de valores anômalos pela última leitura válida | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 53 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de tensão com substituição de valores anômalos por -1" | 76 |
| Figura 54 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de tensão com substituição de valores anômalos pela última leitura válida | 77 |
| Figura 55 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperaturas ao longo do ensaio . . . | 77 |
| Figura 56 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Variações das temperaturas ao longo de vinte horas | 78 |
| Figura 57 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Tensão de alimentação ao longo do ensaio | 78 |
| Figura 58 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Intensidade das descargas ao longo do ensaio | 79 |
| Figura 59 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperatura e intensidade de descargas ao longo do ensaio | 80 |
| Figura 60 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperatura x Q_m e regressão linear | 80 |
| Figura 61 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Temperaturas ao longo do ensaio . | 81 |
| Figura 62 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Variações das temperaturas ao longo de vinte horas | 82 |
| Figura 63 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Tensão de alimentação ao longo do ensaio | 82 |
| Figura 64 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Intensidade das descargas ao longo do ensaio | 83 |
| Figura 65 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Temperatura e intensidade de descargas ao longo do ensaio | 84 |
| Figura 66 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Q_m medido e Q_m estimado ao longo do ensaio | 84 |
| Figura 67 – Duração dos semiciclos de aquecimento de aquecimento | 85 |
| Figura 68 – Média da corrente induzida na barra em cada ciclo de aquecimento . . | 86 |
| Figura 69 – Média da tensão aplicada a barra em cada ciclo de aquecimento | 86 |
| Figura 70 – Média da intensidade das descargas parciais em cada ciclo de aquecimento | 87 |
| Figura 71 – Duração dos semiciclos de resfriamento | 88 |
| Figura 72 – Média da corrente induzida na barra em cada ciclo de resfriamento . . | 88 |
| Figura 73 – Média da tensão aplicada a barra em cada ciclo de resfriamento | 89 |
| Figura 74 – Média da intensidade das descargas parciais em cada ciclo de resfriamento | 90 |
| Figura 75 – Comparação das médias de intensidade das descargas parciais nos ciclos de aquecimento e resfriamento | 90 |
| Figura 76 – Dashboard web no PI Vision para monitoramento remoto de ensaio de ciclos térmicos | 91 |
| Figura 77 – Datablocks utilizados | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 78 – Datablock para armazenamento dos resultados dos cálculos com as temperaturas | 96 |
| Figura 79 – Datablock para armazenamento das temperaturas em graus Celsius | 96 |
| Figura 80 – Datablock para armazenamento dos valores dos contadores do programa | 96 |
| Figura 81 – Datablock para armazenamento dos valores dos temporizadores do programa | 96 |
| Figura 82 – Datablock para as flags indicativas do programa | 97 |
| Figura 83 – Datablock com os parâmetros de configuração do bloco Modbus | 97 |
| Figura 84 – Datablock com os registros Modbus para comunicação | 97 |
| Figura 85 – Tags do CLP: tags de sistema, entradas e saídas | 98 |
| Figura 86 – Tags IHM: usadas na criação das IHMs desenvolvidas | 99 |
| Figura 87 – Rede 1 - desenvolvida para controlar o ensaio de ciclos térmicos | 100 |
| Figura 88 – Continuação da rede 1 | 101 |
| Figura 89 – Rede 2 - controle dos registros de comunicação entre CLP e PI System | 102 |
| Figura 90 – Continuação da rede 2 | 103 |
| Figura 91 – Rede 3 - Bloco de configuração da comunicação Modbus | 103 |
| Figura 92 – Rede 4 - Cálculo da temperatura média para controle do ensaio | 104 |
| Figura 93 – Continuação da rede 4 | 105 |
| Figura 94 – Rede 5 - Timer de uma hora implementado por razões de segurança | 106 |
| Figura 95 – Primeira parte do arquivo de configuração da Interface UFL | 107 |
| Figura 96 – Segunda parte do arquivo de configuração da Interface UFL | 108 |
| Figura 97 – Script desenvolvido em PowerShell para conversão de UCS-2 para UTF-8 | 109 |

Lista de tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Divisão da radiação infravermelha, conforme ABNT (2016) | 22 |
| Tabela 2 – Tecnologias de Rede de campo para Smart Grids, adaptado de Sauter e Lobashov (2011) | 25 |
| Tabela 3 – Tipos de registro Modbus segundo Organization (2018) | 27 |
| Tabela 4 – Tabela com os nomes de domínio e endereço IP de cada nó do sistema | 32 |
| Tabela 5 – Tabela dos endereços Modbus do Fieldlogger e suas leituras correspondentes em Float | 44 |
| Tabela 6 – Mínima área de medição confiável, adaptada de (FLIR, 2016) | 45 |
| Tabela 7 – Tabela de endereços dos registros Modbus da câmera de termovisão . . | 46 |
| Tabela 8 – Tabela de endereços dos registros Modbus do Fieldlogger e suas leituras correspondentes | 46 |
| Tabela 9 – Tabela dos registros Modbus do CLP e seus respectivos endereços . . . | 49 |
| Tabela 10 – Tabela de Endereços IP dos equipamentos | 50 |
| Tabela 11 – Quantidade de tags por equipamento | 56 |
| Tabela 12 – Tabela de comparação da temperatura nos horários de término de resfriamento | 66 |
| Tabela 13 – Tabela de comparação da temperatura nos horários de término de aquecimento | 67 |
| Tabela 14 – Registros Modbus de Interface com o PI e suas finalidades | 100 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|----------|--|
| AD DC | Active Directory Domain Controller |
| AF | Asset Framework do PI System |
| APs | Access Points |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| DP | Descarga Parcial |
| EFs | Event Frames do PI System |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| FOV | Field of View (Campo de visão) |
| IHM | Interface Homem Máquina |
| IIoT | Industrial Internet of Things |
| IoT | Internet of Things |
| IP | Internet Protocol |
| LAT-EFEI | Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI |
| MES | Manufacturing Execution Systems |
| PI | PI System |
| PI ICU | PI Interface Configuration Utility |
| PIMS | Plant Information Management System |
| PI SE | PI System Explorer |
| PI SMT | PI System Management Tools |
| PI UFL | PI Interface for Universal File and Stream Loading |
| PoE | Power over Ethernet |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition |
| TC | Transformador de Corrente |
| UNIFEI | Universidade Federal de Itajubá |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | Motivação | 17 |
| 1.2 | Objetivos | 18 |
| 1.3 | Contribuições do trabalho | 19 |
| 1.4 | Organização do trabalho | 19 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA | 20 |
| 2.1 | Descargas Parciais | 20 |
| 2.2 | Termografia infravermelha e termovisores | 21 |
| 2.3 | Redes de comunicação e protocolo Modbus | 24 |
| 2.3.1 | Protocolo Modbus | 25 |
| 2.4 | Software PIMS e o PI System | 27 |
| 2.4.1 | PI System | 28 |
| 3 | A BANCADA DE ENSAIOS E SUA CONFIGURAÇÃO | 31 |
| 3.1 | A arquitetura do PI na UNIFEI | 31 |
| 3.2 | A bancada de ensaios | 33 |
| 3.2.1 | Fonte de tensão e demais equipamentos para aplicação de potencial | 33 |
| 3.2.2 | Sistema indutor de corrente | 34 |
| 3.2.3 | Sistema de refrigeração | 35 |
| 3.2.4 | Medidor de descargas parciais - Haefely Test AG: DDX 9121b | 36 |
| 3.2.5 | Leitura de tensão | 39 |
| 3.2.6 | Leitura de corrente | 41 |
| 3.2.7 | Termopares | 42 |
| 3.2.8 | Fieldlogger | 43 |
| 3.2.9 | Câmeras termográficas - FLIR AX8 | 43 |
| 3.2.10 | Termohigrômetro - Comet T3511 | 46 |
| 3.2.11 | Módulo CLP - Exsto XC136 | 47 |
| 3.2.12 | Circuito driver de acionamentos | 48 |
| 3.2.13 | Configuração de rede dos equipamentos | 50 |
| 3.3 | Configuração das interfaces e criações de tags no PI System para a coleta de dados | 50 |
| 3.4 | Configuração da árvore AF, eventos e notificações no PI | 56 |
| 4 | PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NA BANCADA | 62 |
| 4.1 | Ensaio de 1000 horas sob tensão aplicada | 62 |

| | | |
|------------|--|----------------|
| 4.2 | Ensaio de ciclos térmicos | 62 |
| 4.2.1 | Ensaio experimental de Ciclos térmicos | 63 |
| 4.3 | Ensaio de resistência a tensão | 68 |
| 5 | RESULTADOS E FUNCIONAMENTO | 70 |
| 5.1 | Ensaio de 1000 horas sob tensão aplicada | 70 |
| 5.1.1 | Ensaio de 1000 horas sob tensão de 8kV (1 pu) aplicada | 70 |
| 5.1.2 | Ensaio de 1000 horas sob tensão de 16kV (2 pu) aplicada | 70 |
| 5.2 | Ensaio de de ciclos térmicos com tensão aplicada | 74 |
| 5.2.1 | Ensaio de ciclos térmicos sob tensão de 8 kV (1 pu) aplicada | 74 |
| 5.2.2 | Ensaio de ciclos térmicos sob tensão de 10 kV (1,25 pu) aplicada | 81 |
| 5.2.3 | Análise dos eventos de ciclos | 84 |
| 5.2.3.1 | Análise de Ciclos de Aquecimento | 85 |
| 5.2.3.2 | Análise de Ciclos de Resfriamento | 87 |
| 5.2.4 | Monitoramento online dos ensaios de ciclos térmicos | 89 |
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 92 |
| 6.1 | Trabalhos Futuros | 93 |
| | APÊNDICES | 94 |
| | APÊNDICE A – PROGRAMA DO CLP (LADDER) | 95 |
| A.1 | Variáveis, constantes e Datablocks utilizados | 95 |
| A.2 | Network 1 - Controle do ensaios de ciclos térmicos | 98 |
| A.3 | Network 2 - Interface entre CLP e PI | 99 |
| A.4 | Network 3 - Configuração do Modbus do CLP | 99 |
| A.5 | Network 4 - Cálculos envolvendo as temperaturas | 101 |
| A.6 | Network 5 - Temporizador de segurança | 102 |
| | APÊNDICE B – PROGRAMAS COMPLEMENTARES | 107 |
| B.1 | Arquivo de Configuração interface UFL | 107 |
| B.2 | Script PowerShell | 109 |
| | ANEXOS | 111 |
| | ANEXO A – ARTIGO SUBMETIDO | 112 |
| | REFERÊNCIAS | 120 |

1 Introdução

Descargas parciais em geradores, podem ser definidas como pequenas faíscas ou centelhas, causadas devido ao fluxo de cargas elétricas quando ocorre uma pequena ruptura de gás. Isso normalmente ocorre nos pequenos vazios presentes nas isolações de máquinas elétricas quando o campo elétrico incidente ultrapassa o valor de rigidez dielétrica do gás que preenche esses vazios.

A descarga é dita parcial porque em série com tais vazios existe um material isolante que apresenta uma rigidez dielétrica muito superior. Segundo a norma IEEE STD 1434-2002, descargas parciais são descargas elétricas incompletas entre isolação-isolação ou isolação e condutor. Ou seja, no caso de geradores, pode-se definir que as descargas parciais são descargas elétricas incompletas que ocorrem no interior das bobinas de estator e só ocorrem em geradores com tensão superior a 2,3 kV.

Stone et al. (2004) afirma que as descargas parciais nos geradores normalmente são intensificadas devido aos estresses elétricos, térmicos, mecânico, termomecânico, entre outros presentes na operação deste elemento. Assim, o monitoramento das descargas parciais proporciona um diagnóstico da condição da isolação dos geradores. A evolução das descargas parciais indica que a sua isolação está mais degradada ou envelhecida devido a ação dos múltiplos estresses presentes na operação.

O monitoramento online de descargas parciais proporciona resultados que facilitam a programação de atividade de manutenção e reparo dos enrolamentos de estator além de dados para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a previsão da vida útil remanescente de geradores.

Segundo levantamentos estatísticos apresentados em CIGRE (2003), a falha na isolação do estator representa a maioria das falhas incidentes nos geradores. Foram desenvolvidas diversas análises estatísticas em diferentes trabalhos a partir de dados de unidades geradoras que estiveram em operação e Sumereder (2008) apresenta a conclusão que a vida útil do gerador está diretamente relacionada a vida útil da isolação.

Os trabalhos de Kokko (2010), Stone et al. (1988), Kielmann e Kaufhold (2010) e Bartnikas e Morin (2006) propõem que o desenvolvimento de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório simulando os principais estresses que a isolação da máquina está sujeita durante sua operação, fornece resultados para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a previsão da vida útil remanescente dos geradores.

Os estresses elétricos, térmicos, mecânicos, termomecânicos são os principais estresses que as máquinas elétricas estão sujeitas. Porém Bartnikas e Morin (2006) afirma

que o desenvolvimento de ensaios de envelhecimento impondo um destes estresses por vez, não reproduz o mesmo envelhecimento e a mesma degradação que ocorre com a ação simultânea de todos esses estresses. Assim, o desenvolvimento de ensaios múltiplo-estresse vem sendo proposto, como pode-se observar em [Bartnikas e Morin \(2006\)](#) e [Morin e Bartnikas \(2012\)](#), para simular melhor o que ocorre durante a operação das máquinas elétricas.

1.1 Motivação

O projeto de pesquisa "Proposta de uma abordagem para diagnóstico e avaliação de vida útil de geradores" em desenvolvimento na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), propõe o desenvolvimento de uma metodologia que, com base na compilação e processamento estatístico de dados históricos, definição e padronização de testes e ensaios, avaliação de resultados, análises econômicas, e cruzamento de informações, seja capaz de indicar um diagnóstico preciso da confiabilidade e vida útil de geradores aplicados às centrais hidrelétricas.

Fica evidente a necessidade de empregar diferentes técnicas de análise aos dados disponíveis visando o desenvolvimento da metodologia de previsão e diagnóstico de vida útil. As metodologias que são aplicadas no projeto podem ser classificadas como:

- *Model Based*: modelos obtidos a partir de conhecimento prévio das correlações entre variáveis presentes no sistema;
- *Data-driven*: dados sensoriais são coletados durante a operação e o emprego de diferentes técnicas matemáticas e computacionais permite a extração de modelos do sistema.

Como parte adicional dos estudos relacionados ao projeto foi proposta a realização de ensaios de envelhecimento em enrolamentos de estatores de hidrogeradores submetidas a diferentes tipos de estresse, simultâneos ou não, e também ensaios de diagnóstico via descargas parciais. Tais ensaios precisam ser realizados em bancada de ensaios no Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI (LAT-EFEI), sendo que o principal deles é o ensaio de ciclos térmicos.

Os ensaios de ciclos térmicos desenvolvidos na bancada seguem parcialmente a norma IEEE STD 1310. Este tipo de ensaio é desenvolvido em um enrolamento de estator simulando o efeito termomecânico que as máquinas elétricas estão sujeitas. Porém, diferentemente do que é sugerido na norma, os ensaios de ciclos térmicos realizados na bancada, ocorrem com tensão nominal aplicada a barra. Desta forma, tem-se a simu-

lação dos estresses elétricos e termomecânicos simultaneamente, além de possibilitar o monitoramento das descargas parciais no enrolamento testado durante todo o ensaio.

O procedimento envolve longa repetição de variação das condições de ensaio, pois o enrolamento do estator deve sofrer variação de temperatura interna dentro de uma faixa estabelecida de acordo com sua classe de isolamento, aquecendo até a temperatura atingir o limite superior da faixa, e então ela deve resfriar até atingir o limite inferior, quando o aquecimento deve começar novamente.

Os processos de aquecimento e resfriamento da amostra são realizados de forma sequencial e contínua, através de indução de corrente na barra para o aquecimento, e a interrupção da indução combinada com o uso de dispositivos de aceleração do resfriamento (um soprador de ar) para o resfriamento. A natureza contínua do ensaio implica em funcionamento fora dos horários convencionais do laboratório, ou seja, o ensaio deve continuar durante a noite e madrugada, e também aos fins de semana.

Uma bancada de ensaios automatizada permite a realização dos ensaios com necessidade de poucas intervenções de operadores, apenas para partir o ensaio ou em corrigir eventuais falhas, ao invés de necessitar que a equipe do laboratório ligue e desligue os sistemas de aquecimento e resfriamento, liberando assim a equipe para outras atividades do laboratório, além de assegurar o funcionamento do ensaio mesmo fora do horário de funcionamento do laboratório.

Outra vantagem de uma bancada automatizada é a possibilidade de integração de diversos sensores para diferentes grandezas, permitindo que o comportamento da barra durante o ensaio possa ser analisado de forma mais abrangente. Essa característica vai ao encontro das necessidades das metodologias *data-driven* que requerem grandes quantidades de dados.

Desta forma, o desenvolvimento de uma bancada automatizada integrada a um sistema capaz de coletar e gerenciar os dados gerados, bem como fazer o armazenamento organizado do histórico de ensaios representa um elevado valor não apenas o projeto, mas também para o laboratório em si, pois além de permitir a geração e armazenamento de grande massa de dados de ensaio, pode replicar os conceitos envolvidos no desenvolvimento para a automação de outras bancadas para diferentes ensaios.

1.2 Objetivos

Os objetivos que este trabalho visa atingir são:

- Automação de bancada de ensaios de descargas parciais;
- Monitoramento online dos ensaios de envelhecimento;

- Estabelecimento de plataforma de gerenciamento e historiamento dos dados de ensaio;
- Fornecer uma ferramenta que permita o cálculo de vida útil remanescente do estator.

1.3 Contribuições do trabalho

Como contribuições deste trabalho para a universidade, espera-se:

- Facilidade de realização de ensaios de descarga parciais em estatores no LAT;
- Melhor aproveitamento de tempo da equipe do laboratório, através da automação do ensaio;
- Consolidação e divulgação do conceito de ensaios à distância;
- Geração de dados de descarga parciais para o projeto de pesquisa "Proposta de uma abordagem para diagnóstico e avaliação de vida útil de Geradores";
- Melhoria na análise dos dados de ensaios.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos: Introdução, Revisão da Literatura, A bancada de ensaios e seus dispositivos, Procedimentos de ensaio, Análise de Resultados e funcionamento, e Conclusões e trabalhos futuros.

A revisão da literatura apresenta o embasamento teórico dos temas abordados neste trabalho, com base em revisão de trabalhos publicados. O capítulo 3 apresenta a bancada desenvolvida, e todo o hardware e software envolvido em seu funcionamento. No capítulo seguinte são apresentados os procedimentos de ensaio que devem ser realizados para garantir dados factíveis. Análises do funcionamento da bancada e resultados de ensaio são realizadas no capítulo 5. Finalmente, no capítulo final são apresentadas as conclusões e discutidos trabalhos futuros empregando a bancada e os conceitos propostos.

2 Revisão teórica

Nesta seção é apresentada uma revisão da bibliografia disponível sobre os temas abordados neste trabalho. Trata-se da fundamentação teórica e justificativas para o desenvolvimento da automação da bancada de ensaios da forma como foi concebida.

2.1 Descargas Parciais

De acordo com [Boggs \(1990\)](#) uma descarga parcial pode ser gerada por diversos fenômenos e ocorre quando alguma atividade elétrica dentro de um sistema resulta em uma rápida mudança na configuração do campo elétrico, fazendo aparecer uma corrente em um condutor no ambiente externo, e para esta corrente ser identificada como uma descarga parcial, ela precisa ser suficientemente grande para ser detectada e ocorrer com uma taxa de repetição alta o suficiente para possibilitar diferenciá-la de ruído branco. Ele ainda afirma que as fontes mais comuns de descargas parciais são componentes flutuantes (componentes que não estão ligados a um potencial elétrico bem definido), efeito corona e vazios e discute aspectos de cada um destes tipos.

O uso de testes de descargas parciais para o diagnóstico de condição de estatores de motores e geradores elétricos, é amplamente discutido em trabalhos como: [Stone e Warren \(2004\)](#), [Warren \(2003\)](#), [Stone et al. \(1988\)](#), e [Kurtz, Lyles e Stone \(1984\)](#).

O trabalho de [Kurtz, Lyles e Stone \(1984\)](#) apresenta um tipo de teste de descarga parcial, os impactos e resultados obtidos pela utilização desse teste no diagnóstico de condição e planejamento de manutenção dos enrolamentos de estatores de cerca de 140 geradores em usinas na América do Norte, que levaram a um nível excepcionalmente baixo de substituição e grandes reparos realizados pela Ontario Hydro em seus ativos. Alguns estudos de caso, práticas de manutenção baseadas nos resultados e vantagens do testes são apresentadas e discutidas.

Em [Stone et al. \(1988\)](#) é apresentado um estudo realizado com diversos testes destrutivos e de diagnóstico, entre eles o monitoramento da intensidade de descargas parciais, em enrolamentos de estatores de geradores e motores para verificar a viabilidade do uso de tais testes para a determinação da vida útil remanescente dos enrolamentos.

Como conclusões desse estudo, tem-se, entre outras que os resultados dos testes de diagnósticos, incluindo o de descargas parciais, são mais úteis quando utilizados para a identificação de tendências no histórico de operação do que na estimativa objetiva da vida útil remanescente dos equipamentos em teste.

Uma análise sobre os impactos que fatores como fabricante, o design e o tempo de

uso dos equipamentos causam nas medições de descargas parciais é apresentada em [Warren \(2003\)](#). O trabalho é parte de uma série de trabalhos que investigam como os resultados de testes de descargas parciais em diferentes equipamentos podem ser comparados entre si.

O estudo considera diferentes tipos de estatores, de diferentes fabricantes e com diferentes idades, e foi capaz de identificar diferenças significativas entre os estatores de mesmo tipo de acordo com a idade e fabricante.

Assim como os trabalhos anteriores, recomenda a realização do estudo de tendência individual de cada máquina a partir dos testes de descarga parcial, pois o momento de falha de enrolamento é normalmente resultado de um enrolamento deteriorado que é submetido a estresse extremo, como desbalanceamento do sistema, partidas excessivas, entre outros. Tais fatores são imprevisíveis, tornando impossível a previsão adequada do momento que uma falha acontecerá, no entanto o comportamento das descargas parciais pode indicar quais equipamentos estão mais suscetíveis a falha.

[Stone e Warren \(2004\)](#) fazem análise semelhante ao trabalho de [Warren \(2003\)](#), incorporando também o tipo de isolamento e a tensão de operação como variáveis de interesse aos estudos. Foram utilizadas grandes quantidades de dados históricos de monitoramento de descargas parciais para a realização de tais estudos, e como resultado são apresentadas tabelas com valores esperados de descarga parciais para cada tipo de isolamento, idade e fabricante dos estatore, que podem servir como parâmetro de comparação indicativo do estado do estator em teste.

A análise dos trabalhos sobre descargas parciais e testes de diagnóstico de isolamento de estatores apresentados na literatura disponível difere do trabalho realizado, pois tratam principalmente de testes offline, realizados em intervalos de tempo conforme apresentado por [Stone et al. \(1988\)](#), ao passo que este trabalho propõe o estudo das descargas parciais de forma contínua, ao longo da operação do estator ou de ensaios envelhecimento e diagnóstico com estresses simultâneos aplicados ao estator.

2.2 Termografia infravermelha e termovisores

Os conceitos de termografia infravermelha são atualmente utilizados em diversos campos como o da construção civil, em que são usados para detectar eventuais danos nas construções, como fissuras, deformidades e infiltrações, localização de eventuais vazamentos em tubulações de água e esgoto e também drenos de ar-condicionado.

A termografia infravermelha também é utilizada na análise de instalações elétricas e circuitos eletrônicos visando encontrar pontos com temperaturas fora das condições normais de operação, por exemplo, para identificar um componente sem alimentação,

pois este estará mais frio do que o esperado, ou um ponto de sobrecarga que apresentará temperatura mais elevada.

Outro setor onde a tecnologia também é amplamente utilizada é o industrial onde sua finalidade varia desde identificação de: pontos com má lubrificação ou desalinhamento de peças, falhas de isolamento térmico, e até mesmo em inspeções automáticas capturando anomalias de operação em tempo real.

De acordo com [FLIR \(2016\)](#) o espectro eletromagnético é dividido arbitrariamente em diferentes regiões de acordo com o comprimento da onda, sem que haja diferenças relevantes na radiação ao longo das diferentes bandas do espectro. Todas elas são governadas pelas mesmas leis, e as únicas diferenças existentes são as resultantes das diferenças do comprimento de onda.

A termografia tem como princípio básico a radiação, que como [Santos, Bortoni e Bastos \(2017\)](#) definem, pode ser definida como o processo pelo qual o calor é transferido de uma superfície de alta temperatura para uma outra superfície, separada no espaço, com temperatura mais baixa, sendo assim denominada radiação térmica.

A radiação térmica é emitida por todos os objetos com temperatura acima da temperatura de zero absoluto (0K ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), podendo ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Para as temperaturas típicas encontradas na Terra, segundo [Chrzanowski \(2001\)](#), a maior parte da radiação térmica é emitida dentro da faixa de infravermelho.

Segundo [Maldague e Moore \(2001\)](#) a termografia consiste na detecção da radiação infravermelha emitida por um objeto de interesse, que é invisível ao olho humano, e sua transformação em imagens térmicas, com possibilidade de convertê-las ainda em leituras de temperatura.

O espectro da radiação infravermelha pode ser dividido arbitrariamente em diferentes classificações de onda infravermelha, [Santos, Bortoni e Bastos \(2017\)](#) citam algumas dessas diferentes divisões e a tabela 1 apresenta a divisão da radiação adotada pela [ABNT \(2016\)](#).

Tabela 1 – Divisão da radiação infravermelha, conforme [ABNT \(2016\)](#)

| Região (abreviação) | Faixa de comprimento de onda |
|---------------------|------------------------------------|
| IR-A | $0,78\mu\text{m} - 1,4\mu\text{m}$ |
| IR-B | $1,4\mu\text{m} - 3\mu\text{m}$ |
| IR-C | $3\mu\text{m} - 1000\mu\text{m}$ |

O comportamento físico da radiação infravermelha, desde sua emissão até a recepção pode explicado através da teoria da radiação, com as notáveis contribuições de Kirchhoff, Stefan, Boltzmann, Planck e Wien.

Desta forma, a tecnologia dos termovisores foi desenvolvida para captar a radiação

infravermelha e transformá-la em imagem visível e em leituras de temperatura. A escolha de termovisor adequado às características do processo a ser inspecionado, é fundamental para o sucesso de tal inspeção, e deve ser baseada em fatores como temperatura do objeto a ser inspecionado (influência na faixa de temperatura e melhor faixa de comprimento de onda que o termovisor pode captar), distância e dimensão do objeto (define a resolução espacial e de medida) e a temperatura do ambiente (pois define a faixa de operação do termovisor).

Quanto as tecnologias de detecção, elas podem basicamente ser divididas em sistema de detecção por varredura - onde há apenas um elemento detector ou um arranjo linear destes, e através de um conjunto eletromecânico de espelhos ou prismas rotativos é realizada a varredura da cena de interesse - ou por sistema fixo de detecção, também conhecido como Matriz de plano focal - em que se utiliza detectores em arranjo de matriz bidimensional para captar diretamente a radiação infravermelha da cena de interesse.

[Santos, Bortoni e Bastos \(2017\)](#) definem duas grandes categorias de detectores de infravermelho:

- Detectores térmicos: respondem a mudança de temperatura com uma variação correspondente de alguma propriedade física, como por exemplo, a sua resistência. Operam em temperatura ambiente e têm resposta espectral ampla e uniforme. Comparados aos fotodetectores apresentam baixa sensibilidade e tempo de resposta lento (ordem de milissegundos).
- Detectores de fótons ou fotodetectores: respondem diretamente à incidência de radiação através de liberação de cargas elétricas. Funcionam geralmente com sistemas de resfriamento para operar em temperaturas abaixo de zero visando melhor desempenho. Possuem resposta espectral limitada, alta sensibilidade e rápido tempo de resposta (ordem de microssegundos).

Outro fator preponderante para a termografia é a emissividade que é uma propriedade de superfície que determina a capacidade desta superfície em emitir radiação, cujos valores podem variar de zero (refletor perfeito) até um (emissor perfeito - Corpo Negro). Segundo [Epperly, Heberlein e Eads \(1997\)](#) a emissividade pode variar com a qualidade da superfície, comprimento de onda, formato do objeto, temperatura e ângulo de visão.

Uma vez que os termovisores não medem diretamente a temperatura, mas sim a radiação, as leituras de temperatura fornecidas pelo termovisor são muito dependentes da emissividade como comprova o trabalho de [Madding \(1999\)](#).

2.3 Redes de comunicação e protocolo Modbus

Com os avanços de conceitos como IoT, Big Data, computação em nuvem, entre outros, observa-se que o mundo passa por uma nova revolução, onde as interações tecnológicas apresentam-se de forma cada vez mais intensa em nossa sociedade. Trata-se de uma era em que há uma explosão de conectividade, onde cada vez mais dispositivos são capazes de adquirir e transmitir dados via rede, e nesse contexto é fundamental o papel das redes de comunicação.

Wollschlaeger, Sauter e Jasperneite (2017) fazem uma análise dos impactos que estes novos conceitos tem sobre as redes de comunicação sob a ótica da automação num ambiente repleto dos conceitos previamente mencionados, abordando o surgimento do conceito de Industrial IoT (IIoT), bem como o desenvolvimento e uso da nova geração de redes de telecomunicação, entre elas a 5G, voltada também para o ambiente industrial, diferentemente das gerações anteriores que não lidavam com esses tipos de aplicações.

Os autores também abordam o desenvolvimento do protocolo *Ethernet time sensitive networking* (Ethernet TSN) e como tal protocolo promete impactar o ambiente industrial atendendo de forma uniforme os requisitos de confiabilidade e tempo-real, tão necessários para os sistemas de automação. É importante evidenciar que até o presente momento, nenhuma das soluções Ethernet disponíveis atendem a todos estes requisitos, e portanto, o potencial da tecnologia Ethernet TSN é bastante atrativo.

No contexto do gerenciamento de energia Sauter e Lobashov (2011) dizem que as redes de comunicação devem ser capazes de oferecer serviços como: alta confiabilidade e disponibilidade, gestão automática de redundância, gerência de grande número de nós de comunicação, entre outros.

Em seu trabalho Carmelito (2017) afirma que um sistema de comunicação para *smart grids* baseia-se nos conceitos de IP (*Internet Protocol*) em redes de fibra óptica, onde a comunicação do sistema de baixo nível precisa estar conectada por uma rede de campo apropriada em que a interligação dos dois domínios de rede é realizada por *Access Points* (APs). Na tabela 2 adaptada de Sauter e Lobashov (2011) são apresentadas várias redes de campo aplicáveis em *smart grids* com seus prós e contras em relação aos requisitos de comunicação.

Carmelito (2017) menciona também que atualmente o cenário *multiclient/multiserver* são predominantes em redes inteligentes. Neste cenário são necessários canais de comunicação entre os softwares envolvidos no sistema (como SCADA e softwares de medição) e o hardware de campo correspondente (como sensores, comutadores, medidores de energia, entre outros). Além disso, também afirma que a arquitetura ideal deve ser aberta de forma a permitir fácil integração futura de novos protocolos, sendo que a abordagem comum defendida por diversos autores é a utilização do protocolo TCP/IP por se tratar

Tabela 2 – Tecnologias de Rede de campo para Smart Grids, adaptado de [Sauter e Lobashov \(2011\)](#)

| Tecnologia | Prós | Contras |
|------------------------------|---|---|
| Linha dedicada | Independente Conexão permanente Grande banda | Alto custo de instalação |
| POTS ISDN GSM | Fácil Manuseio Custo moderado 64kbit/s (ISDN) 9,6kbits/s (GSM) | Dependência de operador Sem influência no caso da acessibilidade Conexões não permanentes |
| GPRS | Fácil Manuseio Custo moderado Conexão permanente | Dependência de operador Sem influência no caso da acessibilidade Requisitos adicionais para a segurança Banda limitada |
| TETRA | Independente Alta disponibilidade Alta acessibilidade | Requer infraestrutura dedicada Limite de banda |
| WLAN WPAN | Independente Conexão permanente Baixo custo dos componentes | Faixa bastante limitada |
| Power Line | Independente Conexão permanente Alta acessibilidade | Maior esforço técnico |

de uma camada de rede consistente possibilitando alcançar comunicação segura e efetiva, de ponta a ponta.

2.3.1 Protocolo Modbus

Segundo [Dutertre \(2007\)](#) o Modbus é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em aplicações de controle distribuído, criado em 1979 pela Modicon (companhia que atualmente faz parte do grupo Schneider Electric) como um protocolo serial de comunicação entre dispositivos de controle "inteligentes". Posteriormente sendo estendido para suportar outros tipos de barramentos e redes, sendo que atualmente, um grande número de sistemas Modbus comunicam-se através de TCP, com o Modbus TCP/IP.

Uma definição mais formal para o protocolo é dada em [Organization \(2018\)](#), segundo o qual o Modbus é um protocolo de mensagens na camada de aplicação, posicionado no nível 7 do modelo OSI, provendo comunicações do tipo cliente/servidor entre dispositivos conectados em diferentes tipos de barramento ou redes. Atualmente o protocolo Modbus é implementado em:

- TCP/IP em Ethernet;
- Transmissão serial assíncrona através de diversos meios (fibra, rádio, cabo: EIA/TIA-232-E, EIA-422, EIA/TIA-485-A).

O protocolo define uma unidade de dados simples denominada *Protocol Data UNIT* (PDU), que se mantém nas diversas variantes do protocolo e camadas de comunicação, o *frame* de comunicação pode incluir informações adicionais e é chamado de *Application Data Unit* (ADU) é apresentado na figura 1.



Figura 1 – Frame de comunicação Modbus, [Organization \(2018\)](#)

Ainda segundo as definições de [Organization \(2018\)](#) a ADU é construída pelo dispositivo cliente que inicia a transação Modbus. O código da função indica o tipo de operação a ser executada e é transmitido através de um byte, podendo receber valores decimais de 1 a 255, sendo que o código 0 é, portanto inválido, e a faixa entre 128 e 255 reservada para uso em respostas de erro (exceção). Dados como os endereços dos registros, quantidade de itens a ser tratada e contagem de bytes de dados são enviadas no campo de dados das mensagens do cliente para o servidor.

Se nenhum erro é detectado na ADU, o campo de dados de uma resposta de um servidor para o cliente contém os dados solicitados. Nessa resposta o server utiliza o código da função para indicar que a mensagem contém ou não erros. Caso não haja erros, o server repete o código da função enviado na requisição, do contrário o substitui pelo código da exceção ocorrida.

Os registros Modbus podem ser basicamente de quatro tipos conforme a tabela 3 e os códigos da função variam conforme o tipo de registro a ser acessado, por exemplo: a função de código 3 corresponde a leitura de valores de um registro de armazenamento (*holding register*).

Tabela 3 – Tipos de registro Modbus segundo [Organization \(2018\)](#)

| Tipo de registro | Tamanho | Acesso | Alterações realizadas por: |
|----------------------------|-----------|-----------------|------------------------------------|
| Entradas discretas | Bit único | Leitura | Sistemas de I/O (CLP, por exemplo) |
| Bobinas | Bit único | Leitura/escrita | Aplicações ou programas |
| Registros de entrada | 16-bits | Leitura | Sistemas de I/O (CLP, por exemplo) |
| Registros de Armazenamento | 16-bits | Leitura/escrita | Aplicações ou programas |

2.4 Software PIMS e o PI System

Um sistema PIMS *Plant Information Management System* pode ser definido, de acordo com [Carvalho et al. \(2005\)](#), como "sistemas de aquisição de dados que, basicamente, recuperam os dados do processo em fontes distintas armazenam num banco de dados único e os disponibilizam através de diversas ferramentas".

As aplicações PIMS atuam na mesma camada da pirâmide de automação que as aplicações MES: entre as camadas SCADA e ERP, conforme ilustra a figura 2, porém podem possuir a capacidade de comunicação com os elementos de todas as camadas, até mesmo diretamente com a camada de campo. A figura 3 detalha esse modelo de forma hierárquica usando os níveis de função de cada sistema dentro da pirâmide.

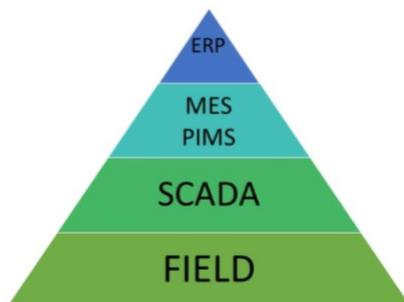


Figura 2 – A pirâmide de automação

Essa capacidade de interação com diferentes sistemas implica na possibilidade de as aplicações PIMS funcionarem de forma eficiente como solução para evitar a fragmentação dos dados ao longo da planta ou processo monitorado.

Segundo [Carmelito \(2017\)](#) uma aplicação PIMS deve atender as seguintes características:

- Coleta de dados de diversos pontos da planta;
- Compressão de dados;
- Dados em tempo real;
- Alta capacidade de armazenamento;
- Alta velocidade de consulta de dados;

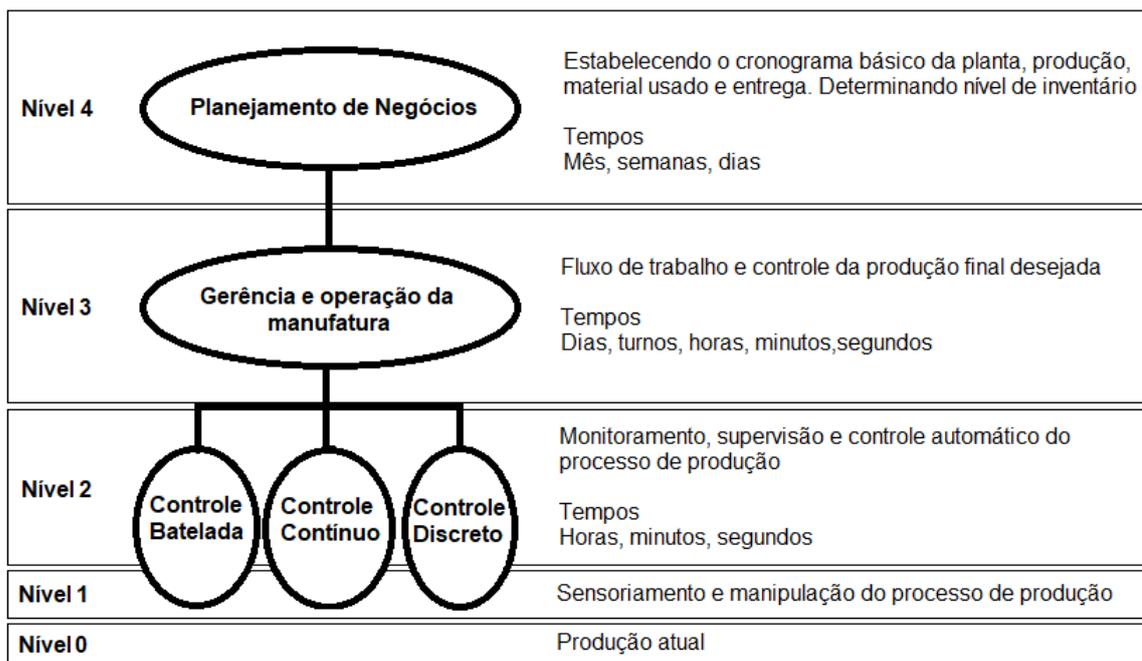


Figura 3 – Modelo hierárquico para a pirâmide de automação, adaptado de ISA (2010)

- Utilização de ferramentas clientes.

2.4.1 PI System

Com a consolidação e os avanços dos conceitos de PIMS, diversos fabricantes fornecem soluções para atender as necessidades desse mercado. Dentre elas, empresa americana OSIsoft Inc. criou o PI System em 1985 visando inicialmente atender as necessidades de historiamiento de dados de empresas do setor de óleo e gás, desde então o PI System foi evoluindo e consolidando-se como um dos *big players* do mercado de aplicações PIMS.

O software agrega valor para seus usuários através da capacidade de coletar, armazenar, analisar, visualizar e compartilhar grandes quantidades de dados e séries temporais de diversas fontes, mantendo alta fidelidade, além de permitir e facilitar a extração de conhecimento da massa de dados.

Em termos estruturais o PI System pode ser dividido em três camadas: PI System Connections, PI Server e PI System Tools. A primeira camada, PI System Connections lida diretamente com a conexão aos dispositivos monitorados, pequenas aplicações denominadas interfaces ou conectores foram desenvolvidas para diferentes formatos de dados ou comunicação, existindo ao todo mais de 400 aplicações do tipo. Essas aplicações são responsáveis por coletar os dados, ajustá-los ao formato de armazenamento do PI vinculando um *timestamp* aos valores de leitura e então enviá-los ao servidor, o PI Server.

O PI Server é constituído pelo PI Data Archive, - o banco de dados que armazena as leituras das tags ao longo do tempo, e pelo PI Asset Framework (PI AF) que é

uma ferramenta que integra, contextualiza e referencia as tags em modelos hierárquicos centrados em ativos que representam plantas, objetos ou equipamentos, permitindo uma descrição detalhada dos ativos monitorados. Além disso, outras ferramentas para análises, identificação de eventos e notificações fazem parte desta camada.

Por fim, a camada de "aplicações cliente" que acessam os dados do PI Server, conforme as necessidades de visualização do usuário. Existem aplicações como o PI Data Link e o PI ProcessBook que podem acessar dados tanto via PI Server quanto via PI AF, e outras que acessam apenas via PI AF como o PI Vision (antigo PI Coresight). Além disso existem uma série de outras ferramentas que permitem a integração de diferentes tecnologias ao PI, como ferramentas para programação, integradores com softwares de ERP e georreferenciamento, entre outros. A figura 4 ilustra a estrutura do PI System, desde os dispositivos até os usuários dos dados.

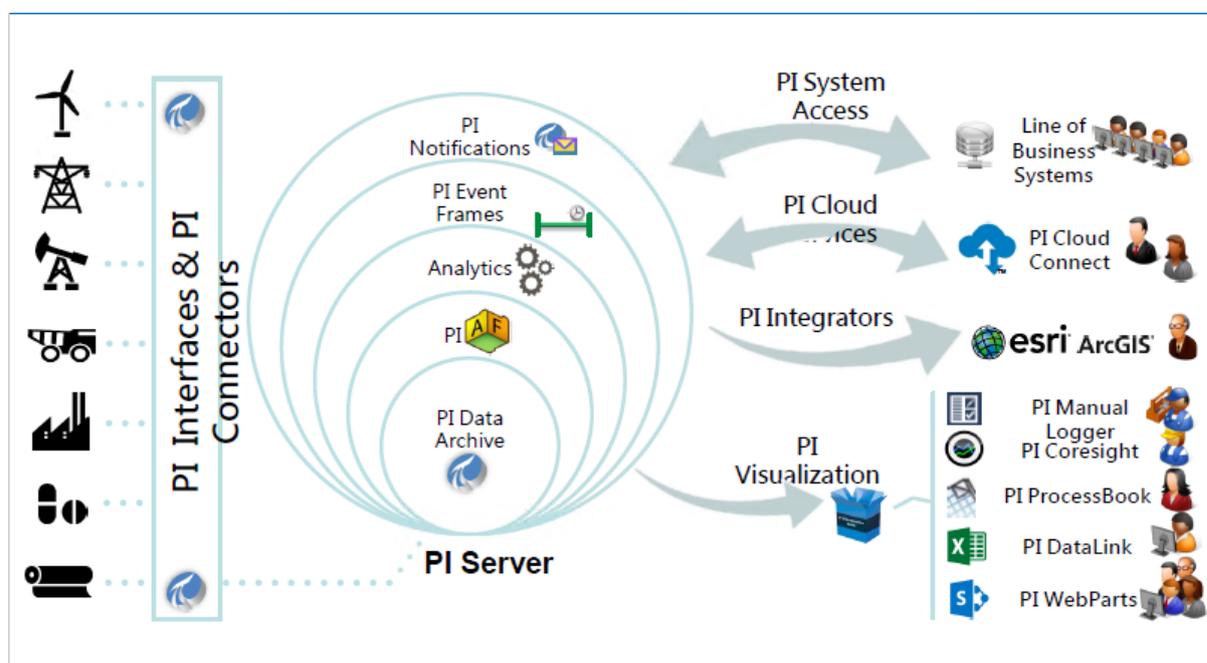


Figura 4 – Estrutura geral do PI de acordo com OSIsoft (2016)

Para o funcionamento adequado do sistema, é necessário atentar-se também a arquitetura escolhida, pois alguns subsistemas do PI não podem ser instalados simultaneamente em uma mesma máquina. A figura 5 apresenta um modelo padrão de arquitetura para instalação do sistema.

Não foram encontrados na literatura trabalhos com a aplicação do PI System ou de outras ferramentas PIMS de forma semelhante à proposta deste trabalho: usualmente tais aplicações são utilizadas em ambientes produtivos, e, portanto, não foram encontrados registros de seu uso em ambiente experimental como ocorre neste trabalho.

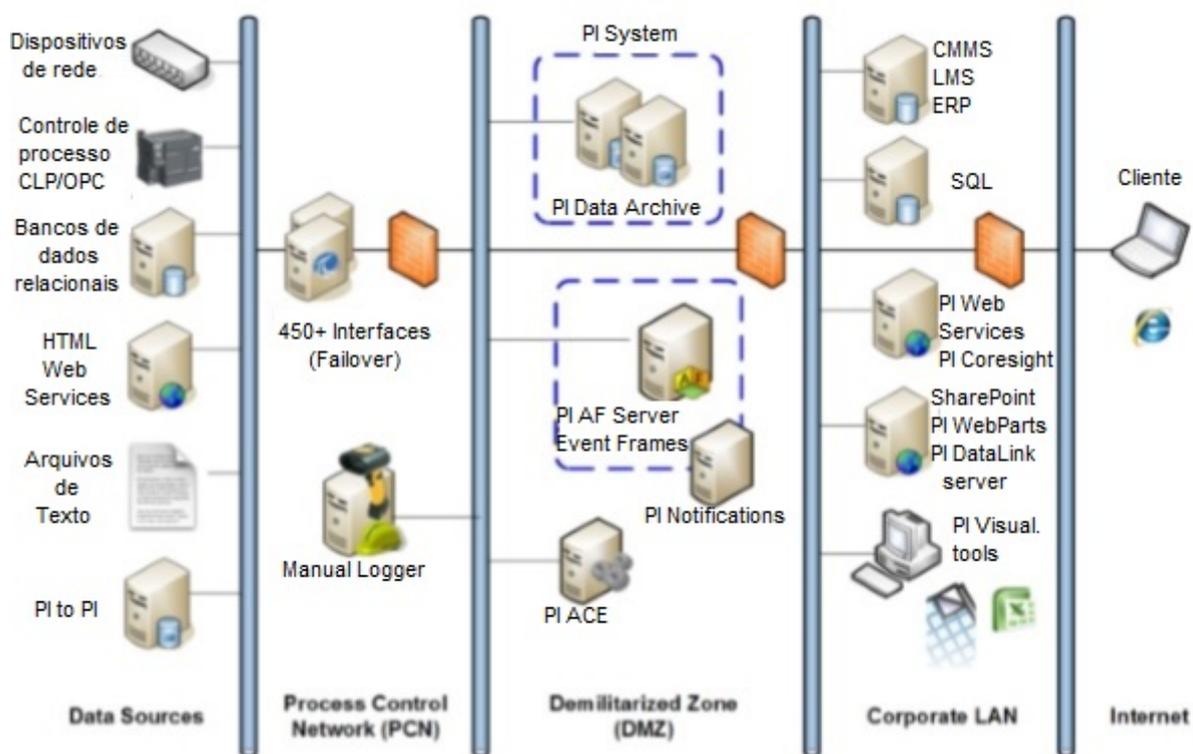


Figura 5 – Modelo genérico de arquitetura de instalação do PI System, de acordo com OSISOFT (2016)

3 A bancada de ensaios e sua configuração

A automação realizada neste trabalho foi realizada em cela e bancada utilizadas no projeto "Proposta de uma abordagem para diagnóstico e avaliação de vida útil de geradores" desenvolvido pela UNIFEI em parceria com a CEMIG. Portanto, nesta bancada são realizados diferentes ensaios de envelhecimento acelerado, com a finalidade de observar os efeitos causados pelos diferentes tipos de estresse que barras de estator de hidrogerador estão sujeitas em sua operação.

Neste momento em que os conceitos de IoT e IIoT são amplamente debatidos propõe-se que a bancada integre o maior número possível de dispositivos capazes de se comunicar via rede, porém utilizando o Protocolo Modbus - ainda que este apresente limitações em suas funcionalidades para os cenários IoT e IIoT - devido as características do projeto e dispositivos envolvidos, a um sistema que permita o gerenciamento de dados e a operação remota da bancada, através da utilização integrada do PI System com o sistema de comando da bancada, permitindo alta acessibilidade aos resultados, utilizando inclusive ferramentas web.

Um sistema PIMS robusto como o PI System apresenta elevado custo de implementação, portanto, em um cenário com recursos limitados, a decisão de utilizá-lo no projeto teve como base dois fatores:

- O projeto de P&D prevê a comparação dos resultados dos ensaios de laboratório com dados obtidos de usinas hidrelétricas da CEMIG que já encontram-se armazenados via PI System na empresa;
- Disponibilidade do PI System na UNIFEI, devido à parceria entre a universidade e a desenvolvedora;

As próximas seções deste capítulo detalham os equipamentos e softwares utilizados no desenvolvimento da bancada, bem como as configurações realizadas para permitir o seu funcionamento automatizado.

3.1 A arquitetura do PI na UNIFEI

O PI System foi disponibilizado para a UNIFEI através de parceria com a OSIsoft, seu fabricante, e a sua instalação na UNIFEI ocorreu em outubro de 2016 com a finalidade de estruturar dados de diversos projetos desenvolvidos por docentes e discentes, bem como ser utilizado durante aulas de laboratório de automação e banco de dados. Tais

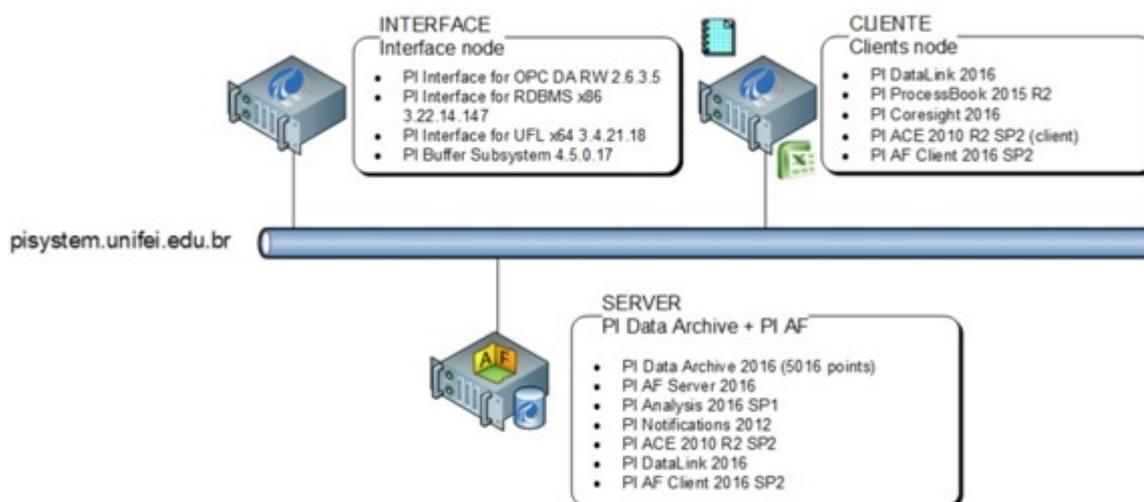


Figura 6 – Arquitetura da Instalação do PI na UNIFEI

características exigem que o sistema possua alta disponibilidade e confiabilidade, bem como permita um adequado nível de controle da acessibilidade dos usuários.

Desta forma decidiu-se pela instalação do sistema em máquinas virtualizadas no data center da UNIFEI, de modo a garantir maior acessibilidade e segurança no armazenamento dos dados. Foi criado então, o domínio: `pisystem.unifei.edu.br` - gerenciado por um Active Directory Domain Controller (AD DC), que servirá ao gerenciamento das informações e acessos dos usuários as máquinas e conseqüentemente dos dados do sistema. Além da máquina para o AD DC foram virtualizadas três máquinas diferentes, uma para cada um dos nós (nodes) do sistema: Servidor (Server), Cliente e Interface. As máquinas devem ser acessadas via área de trabalho remota. Os nomes de domínio e endereços IP de cada máquina são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Tabela com os nomes de domínio e endereço IP de cada nó do sistema

| Nó | Nome de domínio | Endereço IP |
|-----------|---|-----------------|
| AD DC | <code>ad.pisystem.unifei.edu.br</code> | 200.131.128.225 |
| Server | <code>server.pisystem.unifei.edu.br</code> | 200.131.128.3 |
| Cliente | <code>cliente.pisystem.unifei.edu.br</code> | 200.131.128.11 |
| Interface | <code>interface.pisystem.unifei.edu.br</code> | 200.131.128.14 |

Para o controle de acesso às máquinas foram criados grupos de usuários no domínio correspondentes aos diferentes serviços e usuários que acessarão os dados no sistema.

A arquitetura de instalação desenvolvida é apresentada na Figura 6, com todos os componentes instalados em cada máquina.

3.2 A bancada de ensaios

Os ensaios devem ser realizados nas dependências do LAT-EFEI, onde uma cela e bancada de equipamentos foram destinadas à montagem da bancada de ensaios de descargas parciais. Nestes ensaios várias grandezas diferentes devem ser monitoradas e, a depender do ensaio, além desse monitoramento, a bancada deve ser capaz de acionar determinados sistemas de atuação, visando garantir que os procedimentos de ensaio sejam respeitados.

Desta forma, foram instalados diversos equipamentos de medição e atuação na bancada, garantindo a funcionalidade necessária para a realização dos ensaios adequadamente conforme o procedimento previsto. A figura 7 apresenta uma visão geral da bancada com todos os seus dispositivos. Os equipamentos e sistemas são apresentados a seguir.

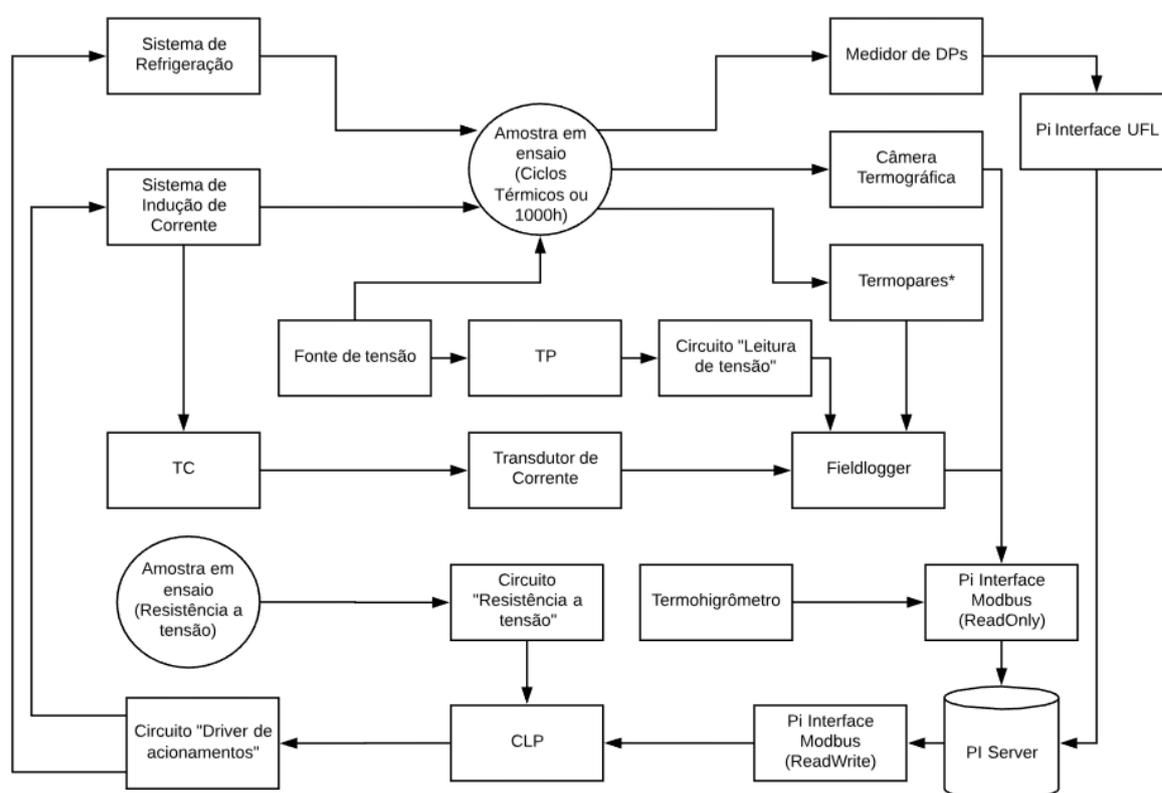


Figura 7 – Esquemático da bancada

3.2.1 Fonte de tensão e demais equipamentos para aplicação de potencial

Para alimentação das amostras, é utilizada uma fonte de tensão alternada de 0 a 100 kV da Balestro, para uma fase, com potência de até 20 kVA. A fonte está posicionada dentro da cela com seu painel de comando posicionado do lado de fora, ao lado da bancada com os demais equipamentos. As figuras 8 e 9 apresentam respectivamente a fonte de tensão posicionada na cela de ensaio e seu painel de comando.



Figura 8 – Fonte de Tensão



Figura 9 – Painel de comando da fonte de tensão

Para conectar a amostra à fonte de tensão, são utilizados cabos de média tensão com mufla. A mesma deve ainda estar conectada ao terra que no laboratório é disponível em pontos demarcados no solo. A figura 10 apresenta o circuito montado com uma amostra devidamente conectada para ser alimentada pela fonte.

3.2.2 Sistema indutor de corrente

Para os ensaios onde há aplicação de corrente, foi desenvolvido um circuito para a aplicação de corrente na barra do estator. Para isso foi utilizado um VARIAC (regulador de tensão) 0 a 240 V que alimentando um grupo de quatro indutores conectados em paralelo e um cabo com isolamento XLPE (Composto termofixo à base de polietileno reticulado) inserido entre os indutores, no qual a corrente elétrica é induzida. Esse cabo isolado é conectado aos terminais da barra, introduzindo desta forma a corrente elétrica na barra de estator. Nessa configuração, a corrente induzida é ajustável e proporcional a tensão fornecida pelo VARIAC, havendo duas formas de controle sobre ela: na primeira a tensão de saída permanece constante e controla-se de forma liga-desliga a alimentação



Figura 10 – Circuito de alimentação

do VARIAC; enquanto na segunda controla-se a tensão na saída através do mecanismo de ajuste do VARIAC.

A figura 11 apresenta o VARIAC utilizado, enquanto a figura 12 apresenta o circuito formado pelos indutores de corrente com o cabo isolado.



Figura 11 – VARIAC utilizado para a indução de corrente

3.2.3 Sistema de refrigeração

No ensaio de ciclos térmicos, a amostra deve aquecer até uma determinada temperatura e depois resfriar até uma temperatura diferente, e os tempos de aquecimento e resfriamento devem ser próximos um do outro. Ao deixar a amostra resfriar naturalmente, notou-se que o tempo de resfriamento ficava muito maior que o de aquecimento, portanto, foi decidido pela utilização de um sistema de resfriamento constituído por um soprador com motor de 0,75 cavalos conectado a um tubo sanfonado flexível com saída de ar direcionada para a barra. Assim, durante o processo de resfriamento da amostra durante os ensaios, uma grande quantidade de ar é direcionada a barra acelerando seu resfriamento.



Figura 12 – Circuito de indutores e cabo isolado

A figura 13 apresenta o sistema com o soprador e o tubo sanfonado flexível.



Figura 13 – Sistema de resfriamento

3.2.4 Medidor de descargas parciais - Haefely Test AG: DDX 9121b

A grandeza de maior interesse de observação da bancada, as descargas parciais, é monitorada pelo medidor de descargas parciais Haefely Test AG, Modelo DDX 9121b. Esse medidor conta com um capacitor de acoplamento de 1 nF, modelo 9230 com tensão máxima de 100 kV e um calibrador de descargas parciais, modelo 9520, com faixa de descargas de 1 pC a 50 nC. Apresentados nas figuras 14, 15 e 16, respectivamente.

Antes de se iniciar um ensaio com medição de descargas parciais, é necessária a calibração do instrumento como pode ser observado na figura 16, o calibrador de descargas parciais é conectado entre os terminais do capacitor de acoplamento que deve estar conectado no circuito a ser ensaiado. Assim, o usuário configura uma descarga conhecida, e o



Figura 14 – Medidor de descargas parciais instalado na bancada

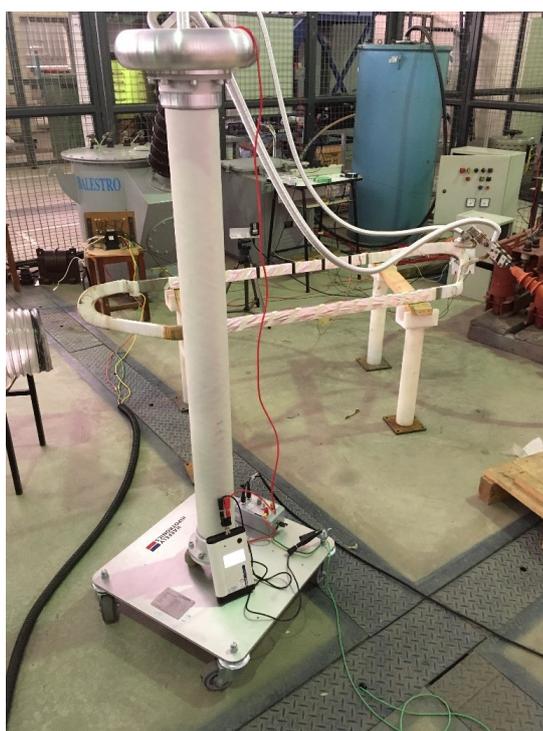


Figura 15 – Capacitor de acoplamento do medidor de descargas parciais

calibrador a aplica no circuito, tal descarga é então monitorada pelo medidor de descarga parciais através do software DDX 9121b, e o usuário pode ajustar parâmetros de configuração da medição. A calibração é finalizada quando o software apresenta uma leitura correta da descarga inserida. Tal software é fornecido pela fabricante junto ao medidor e sua tela principal é mostrada na figura 17.

Este modelo de medidor não possui comunicação Modbus, porém é capaz de ex-

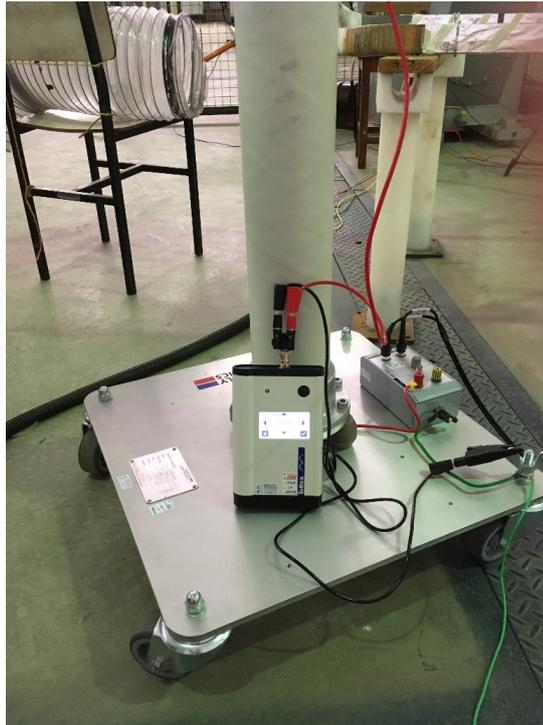


Figura 16 – Calibrador do medidor de descargas parciais conectado ao capacitor de acoplamento

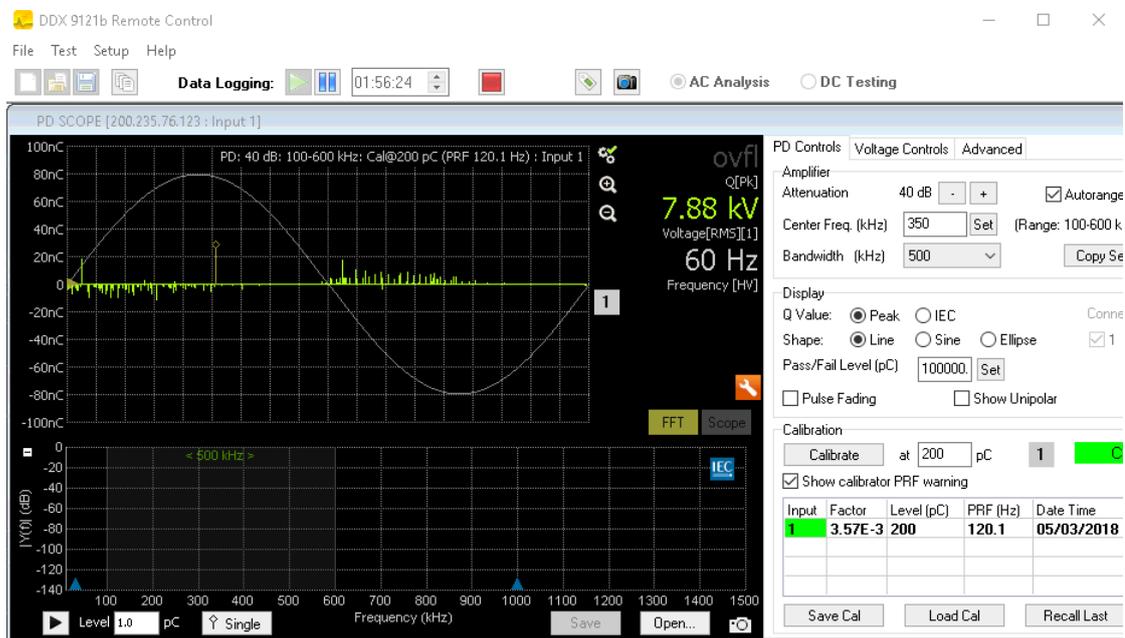


Figura 17 – Tela principal de interface do Software DDX 9112b

portar os dados de leitura em relatórios de texto formato “.csv”. Portanto, foi utilizado um software de macro para *mouses* que inicia o software do medidor, busca a última calibração, inicia a captura de dados, e após 30 (trinta) minutos, finaliza a captura de dados, salva o ensaio e exporta o relatório. Tal sequência de ações é repetida 48 vezes totalizando 24h de operação. Um usuário deve iniciar a macro a cada 24h para que haja

a geração de relatórios correspondente a coleta de todos os dados do ensaio.

Os relatórios em formato ".csv" possuem codificação UCS2 que não é suportada pelas interfaces do PI, é necessário portanto, fazer a conversão dos arquivos para a codificação UTF8. Tal conversão é realizada através de um *script* em PowerShell que monitora a pasta onde os relatórios são salvos e a cada vez que um arquivo UCS2 novo é criado, seu conteúdo é copiado para um arquivo UTF8 correspondente e após a cópia, o arquivo UCS2 é deletado. O script é apresentado na seção B.2 do Anexo B. A interface do PI então realiza a leitura dos arquivos UTF8 para extração dos dados.

3.2.5 Leitura de tensão

Para monitorar a tensão aplicada durante os ensaios existem duas possibilidades, uma utilizando os capacitores do medidor de descargas parciais que funcionam como divisor de corrente e o seu software de relatórios, conforme explicado na seção 3.2.4, desta forma realizando a leitura direta da tensão aplicada. A outra forma é utilizando um dispositivo medidor de tensão.

Os medidores de tensão mais comuns no mercado lêem apenas tensões DC, em escalas determinadas como: 0 a 100mV, 0 a 1V, 0 a 5V ou 0 a 10V. Assim, para realizar as medidas do ensaio, é necessário rebaixar a tensão de alimentação da ordem de kilovolts, e utilizar um circuito retificador, desta forma foi utilizado um transformador de potencial (TP) e um circuito de retificação apresentado na figura 18. Onde a tensão a ser retificada no secundário do transformador T_2 (T_{2s}) é dada por:

$$T_{2s} = \frac{T_{1P} \cdot 115}{13800} \cdot 12 \quad (3.1)$$

Este circuito tem uma limitação de utilização devido ao TP, pois devido a sua classe de isolamento elétrica a máxima tensão aplicada não pode exceder em vinte por cento sua tensão nominal, ou seja, o primário resiste apenas tensões de até 16560V. Sendo assim, tem-se

$$T_{2s} = \frac{16560 \cdot 115}{13800} \cdot 12 \simeq 7,53V \quad (3.2)$$

Desta a forma a tensão V_P após o diodo retificador é:

$$V_P = 7,53\sqrt{2} - 0,7 = 9,94V \quad (3.3)$$

Então determina-se o valor desejado para a tensão de ripple, e conhecendo-se o valor de V_P e a impedância de entrada do Fieldlogger (onde o sinal será conectado) que é de 1,1 M Ω , é possível determinar a capacitância C para filtrar o sinal de acordo tais especificações.

$$C = \frac{V_P}{V_{ripp} \cdot f \cdot R_L} \quad (3.4)$$

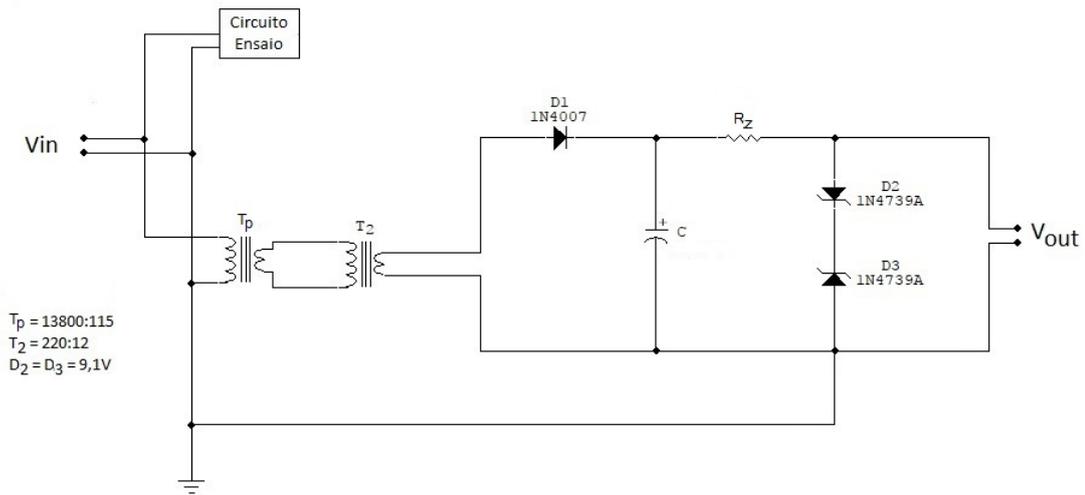


Figura 18 – Esquemático do circuito de retificação

Estipulando uma tensão de ripple de 0,5V, tem-se:

$$C = \frac{V_P}{V_{ripp} \cdot f \cdot R_L} = \frac{9,94}{0,5 \cdot 60 \cdot 1,1 \cdot 10^6} \simeq 300nF \quad (3.5)$$

Portanto, uma capacitância de 300 nF seria suficiente para o filtro necessário, no entanto, por conveniência, e considerando Newton em Braga (2018), que afirma que uma regra prática é que para tensões de saída de 3 a 15 V fica viável a utilização de 1000 μF para cada Ampere na saída, utilizou-se então um capacitor de 1000 μF .

Por fim, é necessário garantir que mesmo no caso de uma operação anômala da tensão de entrada do circuito, seja por problemas na fonte de tensão ou nos transformadores, a saída do circuito não oferece perigo ao dispositivo medidor de tensão, desta forma utilizou-se diodos Zeners para regular o sinal de saída, assim, a tensão será sempre mantida entre 0 e 10 V. O modelo de diodo Zener utilizado: 1N4739A pode fornecer 9,1 V com 1 W de potência e corrente mínima de operação de 10 mA.

Para o correto funcionamento dos diodos é necessário dimensionar a resistência R_Z para limitação da corrente no diodo. Desta forma são feitos os cálculos:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{Zen}}{V_{Zen}} = \frac{1}{9,1} = 0,109A \quad (3.6)$$

$$I_L = \frac{9,1}{1,1 \cdot 10^{-6}} \simeq 8,273\mu A \quad (3.7)$$

$$R_{Zmin} = \frac{V_{in} - V_L}{I_{Zmax} + I_L} = \frac{9,94 - 9,1}{0,109 - 0,000008} \simeq 7,71\Omega \quad (3.8)$$

Sabendo $I_{Zmin}=10\text{mA}$, tem-se:

$$R_{Zmax} = \frac{V_{in} - V_L}{I_{Zmin} + I_L} = \frac{9,94 - 9,1}{0,010 - 0,000008} \simeq 84,07\Omega \quad (3.9)$$

Portanto, para assegurar o funcionamento adequado dos diodos Zener, é necessária a utilização de um resistor entre $8\ \Omega$ e $84\ \Omega$, considerando os valores comerciais disponíveis, foi decidida pela utilização de um resistor de $51\ \Omega$.

3.2.6 Leitura de corrente

As amostras podem apresentar correntes entre 0 e 2500 amperes dependendo das condições de operação, portanto, é necessária a utilização de instrumentação para adequação desta grandeza para medidores comerciais. Um padrão interessante para medidas de corrente é a escala 4 a 20 mA, pois esta escala indica não só a corrente medida, como também indica falhas na leitura quando esta é menor que os 4 mA que correspondem ao zero da escala (usualmente o valor de leitura para falhas é -1).

Desta forma optou-se pela utilização de um transformador de corrente TC com relação de transformação 2500:5, ligado em série a um transdutor de corrente com entrada de 0 a 5 A e saída 4 a 20 mA. O TC utilizado é do tipo janela e foi instalado no cabo isolado do sistema de indução de corrente conforme a figura 19 e sua saída foi conectada ao transdutor de corrente como mostra a figura 20.



Figura 19 – Transformador de corrente - relação 2500:5 - instalado no cabo de alimentação de corrente



Figura 20 – Transdutor de corrente - entrada 0 a 5A; saída 4 a 20mA

Como a corrente induzida é lida através da saída 4 a 20mA do transdutor de corrente, é necessária a realização do cálculo da corrente induzida I_{ind} na barra a partir da leitura I_{med} em mA convertida para A.

$$I_{ind} = (I_{med} - 0,004) \cdot \frac{5}{0,016} \cdot \frac{2500}{5} = (I_{med} - 0,004) \cdot 156250 \quad (3.10)$$

Assim para uma corrente medida de 7,2mA, por exemplo, tem-se uma corrente induzida de 500A:

$$I_{ind} = (0,0072 - 0,004) \cdot 156250 = 500A \quad (3.11)$$

3.2.7 Termopares

Para a medição de temperaturas na amostra foram utilizados instrumentos diferente para leituras com e sem contato com a amostra. As medições feitas com contato, foram realizadas utilizando-se termopares do Tipo K, constituídos de Cromel (liga 90% Cromo e 10% Níquel) e Alumel (liga 95% Níquel e 5% Alumínio). Tais termopares possuem faixa de operação entre -270°C e 1200°C , com sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

O emprego de termopares permite a realização de medições de temperaturas no interior das barras de amostra, desde que sejam realizados furos na isolação, de modo que as pontas dos termopares possam ser inseridas nestes furos até encostar ao cobre da amostra. É importante salientar que essa leitura do interior das barras não pode ser realizada com tensão aplicada a barra, pois a furação compromete a segurança do circuito.

Outra limitação da utilização dos termopares é com relação a alta energização da amostra em sua superfície, pois uma vez que a ponta das sondas dos termopares é metálica, há risco de ser induzida uma tensão na sonda, danificando o medidor.



Figura 21 – Modelo de Fieldlogger utilizado na bancada

3.2.8 Fieldlogger

Como as leituras de corrente, bem como as leituras dos termopares e do circuito retificador são puramente analógicas, não utilizam-se de nenhum protocolo de comunicação, desta forma, para viabilizar a leitura e armazenamento destas grandezas em um sistema como o PI System, é necessária a utilização de um dispositivo capaz de receber essas leituras e disponibilizá-las ao sistema, via protocolo conhecido.

Foi, portanto, decidido pela utilização de um dispositivo chamado Fieldlogger, capaz de realizar leituras de sinais analógicos e digitais, bem como controlar saídas digitais ou do tipo relé, fazer o armazenamento de leituras e disponibilizar os dados via Modbus. Para o projeto, o modelo escolhido é apresentado na figura 21 e possui: 8 entradas analógicas (configuráveis como sinal de termopar de diversos tipos, 0-5 V, 0-10 V, mV, mA, Pt100 ou Pt1000), 8 entradas/saídas digitais, até 128 canais virtuais (para cálculos), capacidade de monitoramento e geração de até 32 alarmes, registro de leituras, fonte auxiliar de 24 V e interfaces IHM, RS-485, Ethernet e USB.

Para uso na bancada foram utilizados 7 entradas analógicas, sendo cinco delas configuradas como Termopar tipo K, uma como entrada analógica 0 a 10V e a última como entrada analógica 4 a 20mA, com comunicação Modbus Ethernet, sem a utilização de registro dos dados - pois tal função já é realizada pelo PI System. Devido ao tipo de grandeza das leituras, os dados foram armazenados em registros de tipo ponto flutuante (Float 32), sendo necessários portanto, dois registros por leitura. Os endereços dos registros mais significativos dentre os utilizados são apresentados na tabela 5. Obs.: O canal analógico 6 não é utilizado.

3.2.9 Câmeras termográficas - FLIR AX8

Para realizar as medidas de temperatura sem contato com as amostras decidiu-se pela utilização de câmeras termográficas, que são capazes de captar não só imagens como

Tabela 5 – Tabela dos endereços Modbus do Fieldlogger e suas leituras correspondentes em Float

| Canal Analógico | Leitura | Endereço |
|-----------------|------------|----------|
| Canal 1 | Termopar 1 | 225 |
| Canal 2 | Termopar 2 | 227 |
| Canal 3 | Termopar 3 | 229 |
| Canal 4 | Termopar 4 | 231 |
| Canal 5 | Termopar 5 | 233 |
| Canal 7 | Tensão | 237 |
| Canal 8 | Corrente | 239 |

as câmeras comuns, como também a radiação no espectro infravermelho (que é invisível ao olho humano) e transformá-la em uma imagem visível aos olhos humanos.

Para a realização de leituras termográficas corretas, é fundamental que a superfície a ser medida possua alto índice de emissividade. No entanto, o procedimento de ensaio prevê a utilização de papel alumínio para embrulhar a barra de amostra, e tal material possui péssimo índice de emissividade. Para solucionar este problema foram feitas marcações com fita isolante preta fosca, material com índice de emissividade próximo a 1, ao longo do barra.

Assim, foi escolhida a câmera termográfica modelo AX8 da FLIR apresentada na figura 22, que possui resolução infra-vermelha de 80x60 pixels e campo de visão de 48°x37°. Em seu manual de usuário (FLIR, 2016), há uma tabela com a área mínima para obtenção de medidas confiáveis, adaptada a tabela 6.



Figura 22 – Câmera termográfica AX8 da FLIR

Como as marcações feitas de fita isolante tem a sua menor dimensão na largura, com aproximadamente quatro centímetros, a câmera deve estar posicionada a aproximadamente um metro de distância da barra em ensaio, para permitir que a temperatura seja medida corretamente.

Este modelo, permite a configuração de até seis medições de tipo ponto e mais seis do tipo box, onde há medição da temperatura máxima, mínima e média. Além disso per-

Tabela 6 – Mínima área de medição confiável, adaptada de (FLIR, 2016)

| Distância(m) | I_{FOV} (mrad) | Área mínima de medição (cm) |
|--------------|------------------|-----------------------------|
| 0,3 | 3 | 1,1x1,1 |
| 0,5 | 5,5 | 1,9x1,9 |
| 1 | 11 | 3,9x3,9 |
| 2 | 22 | 7,8x7,8 |
| 3 | 33 | 11,7x11,7 |

mite a configuração de alarmes, correção de emissividade, comunicação Modbus TCP/IP e alimentação PoE. Para as análises dos ensaios foram configurados 5 boxes ao longo de uma das laterais da barra. A figura 23 apresenta uma imagem capturada pela câmera de termovisão ilustrando os cinco boxes configurados.

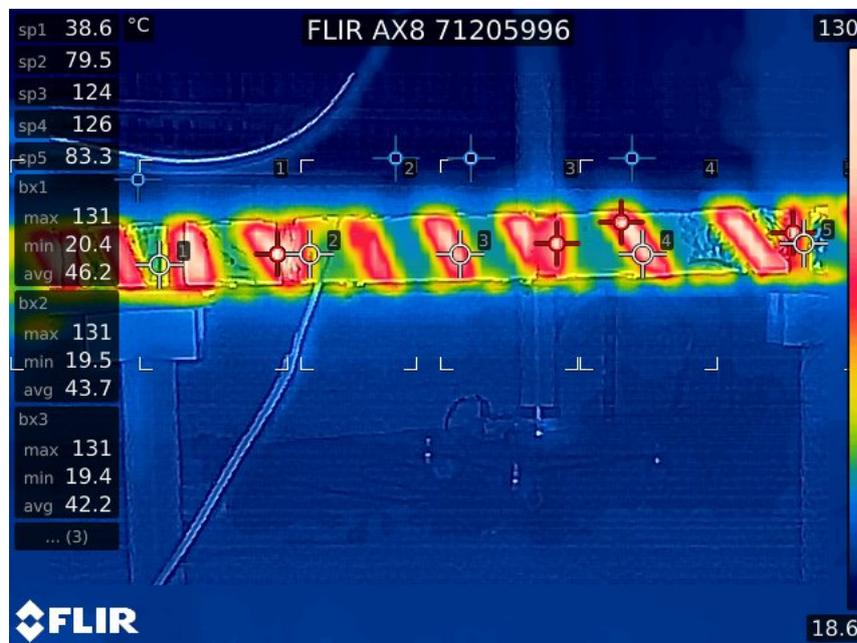


Figura 23 – Foto capturada pela câmera termográfica

Por fim, a câmera disponibiliza as medidas via modbus TCP/IP e os registros utilizados para a leitura dos dados da câmera são apresentados na tabela 7, porém seu endereçamento se dá através de registros com endereços de seis dígitos, e portanto, nem todo dispositivo consegue comunicação direta via Modbus com a câmera. Na bancada, por exemplo, o CLP não consegue lidar com endereços de seis dígitos, porém o PI System consegue bastando suprimir os dois primeiros dígitos (40), neste caso, para a configuração do PI, o endereço a ser utilizada para ler a temperatura interna da câmera, por exemplo, seria "1017" ao invés de "401017".

Tabela 7 – Tabela de endereços dos registros Modbus da câmera de termovisão

| Medida | N = 1 | N = 2 | N = 3 | N = 4 | N = 5 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Interna | 401017 | - | - | - | - |
| SpotN | 401019 | 401031 | 401043 | 401055 | 401067 |
| BoxN.Min | 401021 | 401033 | 401045 | 401057 | 401069 |
| BoxN.Max | 401023 | 401035 | 401047 | 401059 | 401071 |
| BoxN.Avg | 401025 | 401037 | 401049 | 401061 | 401073 |

3.2.10 Termohigrômetro - Comet T3511

Com a finalidade de investigar os impactos que a variação das condições do ambiente podem ter no comportamento da barra durante os ensaios, um termohigrômetro é utilizado para monitorar a temperatura, umidade e ponto de orvalho do ambiente dentro da cela de ensaio. O sensor utilizado é o T3511 da Comet Sensors, conta com uma sonda de medição conectada a um cabo de um metro para permitir flexibilidade de posicionamento e um visor que apresenta a temperatura e a umidade capturadas pela sonda, e é apresentado na figura 24.

O sensor tem um software próprio para sua configuração de rede e comunicação, e disponibiliza suas leituras através de página web e protocolos de comunicação como SNMP, Modbus, SOAP, entre outros. Para a bancada foi utilizada a comunicação via Modbus TCP/IP via Ethernet, e os dados de interesse foram apenas as leituras de temperatura, umidade e ponto de orvalho.

Tais leituras ficam armazenadas em registros de leitura do endereçamento Modbus do sensor, e são do tipo inteiro, com fator de escala de dez vezes o valor real, ou seja, uma temperatura de 25°C corresponde a uma leitura de 250 no registro. Desta forma é necessário fazer um tratamento externo ao sensor para realizar a divisão da leitura por 10 e retornar ao valor real.

A tabela 8 apresenta os registros destinados as leituras de cada grandeza monitorada pelo termohigrômetro na bancada.

Tabela 8 – Tabela de endereços dos registros Modbus do Fieldlogger e suas leituras correspondentes

| Leitura | Endereço |
|------------------|-----------------|
| Temperatura | 49 |
| Umidade | 50 |
| Ponto de Orvalho | 51 |



Figura 24 – Termohigrômetro modelo T3511 da Comet Sensors

3.2.11 Módulo CLP - Exsto XC136

Para monitorar a temperatura e acionar, quando conveniente a indução de corrente para o aquecimento da amostra ou o sistema de refrigeração para o resfriamento desta, foi utilizado o módulo de CLP modelo XC136 da Exsto, que conta com um CLP S7-1200 (CPU 1214C), IHM KTP-700 Basic, ambos da Siemens, cartão de expansão SM1223 (Entradas e saídas digitais), switch Ethernet Scalance XB005 (5portas), bem como fontes, LEDs indicativos, chaves, conectores e dispositivos de segurança. A figura 25 apresenta o módulo com as ligações utilizadas no ensaio.

Onde os destaques são: 1 – CLP, 2 – IHM, 3 – disjuntor que liga o módulo, 4 – luz indicativa de ciclo de aquecimento, 5 – luz indicativa de ensaio de ciclos térmicos em andamento, 6 – luz indicativa que o ensaio de ciclos térmicos pode ser iniciado, 7 e 8 – chaves que, respectivamente, iniciam e pausam o ensaio de ciclos térmicos, 9 - chave que reseta as condições do CLP para reinício do ensaio, 10 – saídas do CLP, 11 – sinais de controle para o circuito de controle do indutor e sistema de refrigeração.

Para a comunicação com o PI e leituras de determinadas grandezas se fez necessária a configuração de rede do CLP para permitir a comunicação via Modbus. O código utilizado no CLP foi desenvolvido em linguagem Ladder com o uso do software da SIEMENS TIA Portal V14, e é apresentado em detalhes no Anexo A deste trabalho.

Para acompanhamento e operação do ensaio também foi desenvolvida interface via IHM apresentada na figura 26. Através da interface IHM é possível iniciar, pausar e reiniciar o experimento, visualizar a temperatura na barra capturada pela câmera e sua evolução num dado intervalo de tempo configurável e verificar o número de ciclos que ainda devem ser realizados até o fim do ensaio.

Para a comunicação Modbus foram utilizados 14 registros de memória do CLP, o conteúdo desses registros é descrito na seção A.3 e a tabela 9 apresenta os endereços



Figura 25 – Módulo XC136 da Exsto - CLP Siemens S7-1200 com algumas das ligações para os ensaios



Figura 26 – Interface IHM desenvolvida para o ensaio de ciclos térmicos

utilizados para o acesso via Modbus.

3.2.12 Circuito driver de acionamentos

O CLP deve comandar a energização dos sistemas de refrigeração ou de indução de corrente de acordo com a temperatura da barra, desta forma, foi decidido pela utili-

Tabela 9 – Tabela dos registros Modbus do CLP e seus respectivos endereços

| Registro | Endereço | Registro | Endereço |
|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 1 | 7 | 15 |
| 1 | 3 | 8 | 17 |
| 2 | 5 | 9 | 19 |
| 3 | 7 | 10 | 21 |
| 4 | 9 | 11 | 23 |
| 5 | 11 | 12 | 25 |
| 6 | 13 | 13 | 27 |

zação de uma saída digital para realização deste controle, porém a saída digital do CLP fornece apenas 0 ou $24V_{DC}$, o sistema de indução requer alimentação $220V_{AC}$ e o sistema de refrigeração $380V_{AC}$. Por esta razão foi desenvolvido um circuito driver para os acionamentos, utilizando dois contatores: um bifásico e outro trifásico, um relé convencional e um relé temporizador - que é usado como dispositivo de segurança para limitar o tempo de aquecimento. Tal circuito é apresentado na figura 27.

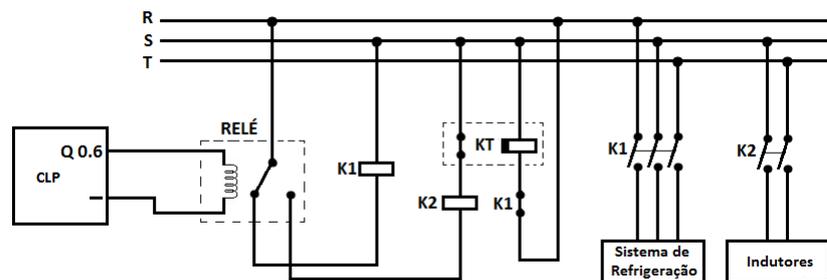


Figura 27 – Circuito desenvolvido para o acionamento dos sistemas de indução de corrente e refrigeração

A saída digital do CLP foi conectada a bobina do relé convencional, cuja bobina é comandada por $24V_{DC}$ com capacidade de conduzir até $250V_{AC}$ nos contatos comum (C), normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF). As bobinas dos dois contatores e do relé temporizador são comandadas por $220V_{AC}$.

O contato NF do relé $24V_{DC}$ foi conectado à bobina do contator trifásico (K_1), seu contato NA foi conectado à bobina do relé bifásico (K_2) e seu contato C foi conectado a uma fase (R) da rede. O contato NF do relé temporizador (K_T) foi conectado à outra conexão da bobina de K_2 , seu contato NA ficou em aberto (sem conexões) e seu contato C foi conectado a uma fase (S) da rede. Um contato de comando NF de K_1 foi conectado a uma fase (R) da rede e a bobina de K_T . Os outros contatos das bobinas K_1 e K_T foram conectados a uma fase diferente (S) da rede. Por fim, os contatos de acionamento dos contatores K_1 e K_2 foram conectados ao sistema de refrigeração e indutores, respectivamente, e às fases correspondentes.

Nesta configuração quando a saída do CLP está desligada, o sistema de refrigeração é acionado. Quando a saída do CLP é ligada, a bobina K1 é desenergizada, o relé temporizador é energizado, assim como a bobina K2, ligando os indutores e mantendo-os ligados até que um dos limites - de temperatura ou de tempo de aquecimento - seja atingido. A configuração do tempo do relé temporizador deve ser feita antes do início do ensaio e de acordo com a taxa de aumento da temperatura durante o ciclo de aquecimento.

3.2.13 Configuração de rede dos equipamentos

Como já mencionado, o protocolo Modbus TCP foi escolhido para a comunicação dos equipamentos da bancada, devido a sua simplicidade e facilidade de configuração. Para possibilitar a comunicação dos equipamentos eles devem estar fisicamente inseridos a rede e devidamente configurados. Para a conexão física da rede, foi utilizado um Switch de rede modelo SG500 da CISCO com 24 portas PoE (Power over Ethernet), que faz a interface dos equipamentos com a rede da Unifei.

Com os equipamentos capazes de acessar a rede, se faz necessária a configuração dos endereços de rede de cada um deles. A tabela 10 apresenta os Endereços IP de todos os equipamentos da bancada:

Tabela 10 – Tabela de Endereços IP dos equipamentos

| Equipamento | Endereço IP |
|------------------------------|--------------------|
| Medidor de DPs | 200.235.76.123 |
| PC com o Software do Medidor | 200.235.77.56 |
| Câmera 1 | 200.235.77.70 |
| Câmera 2 | 200.235.77.71 |
| Câmera 3 | 200.235.77.72 |
| Termohigrômetro | 200.235.77.74 |
| Fieldlogger | 200.235.77.76 |
| CLP | 200.235.77.79 |
| Switch de rede | 200.235.77.80 |

3.3 Configuração das interfaces e criações de tags no PI System para a coleta de dados

Com a bancada devidamente instalada, todos os seus equipamentos funcionais e com a rede configurada, é necessária a viabilização da coleta, armazenamento e gerenciamento dos dados. E para essa função, o PI system foi utilizado.

Uma vez que o PI system utiliza módulos denominados Interfaces para a comunicação com os dispositivos geradores de dados, é necessária a escolha das Interfaces ade-

quadadas ao método de comunicação de oferecido por tais dispositivos. Como vimos na descrição dos equipamentos, praticamente todos os dados gerados na bancada de ensaios estão disponíveis via protocolo Modbus TCP/IP, portanto a interface PI Interface for Modbus Ethernet deve ser utilizada, e esta possui duas versões: ReadOnly e ReadWrite, sendo a diferença apenas na possibilidade de escrita via protocolo presente na ReadWrite.

Decidiu-se pela utilização das duas versões da interface: a ReadWrite apenas para o CLP que receberá valores diretamente do PI System, e a ReadOnly para leitura de todos os demais equipamentos. E uma vez que o medidor de descargas parciais não possui nenhum protocolo de comunicação, conforme mencionado em 3.2.4, foi utilizada uma interface para leitura de arquivos de texto, para extração de dados a partir dos relatórios gerados pelo medidor, tal interface é chamada PI Interface for Universal File and Stream Loading (UFL).

Determinadas as interfaces a serem utilizadas, é necessário a instalação e configuração da mesma, essas etapas são realizadas com a utilização do aplicativo PI Interface Configuration Utility (PI ICU), pertencente ao pacote do PI System. Não importando o tipo de interface, a primeira etapa é definir um nome que permita a fácil identificação da interface pelos usuários, um identificador (o Point Source) e um ID que identifique a instância da interface para as tags que serão atualizadas por ela.

A segunda etapa da configuração corresponde a criação das "Scan Classes" que consistem nos intervalos de varredura da interface. Para criação de uma nova classe basta clicar no botão "Add a scan class", que é o primeiro botão à esquerda na seção "Scan Classes" da aba "General" e então definir o intervalo de tempo em horas, minutos e segundos. A interface UFL tem uma scan class de 30s, a Modbus Read Only possui quatro: 30s e 1, 2 e 5 minutos, e as *scan classes* da Modbus ReadWrite são apresentadas na figura 28, que ilustra a aba de configuração "General".

A penúltima fase consiste na configuração para a leitura dos dispositivos, e cada interface utiliza um arquivo com todos os detalhes da configuração. A criação desses arquivos é feita de forma diferente para as interfaces Modbus e a UFL, e existem aplicativos da OSIsoft que auxiliam essa criação, esses aplicativos são acessíveis através da aba de configuração com o nome de acordo com o tipo da interface "ModbusE" para as interfaces Modbus e "UFL" para a interface UFL. A figura 29 apresenta o aplicativo de auxílio para as interfaces Modbus, onde basta selecionar a aba Node e inserir os endereços IP dos dispositivos que serão lidos pela interface (os endereços listados na figura 29 correspondem aos dispositivos lidos pela Modbus ReadOnly). Para a interface UFL o arquivo de configuração criado é apresentado na seção anexo B.1.

Por fim, é necessário criar o serviço Windows que executará a interface. Para isso, deve-se selecionar "Service" na lista a esquerda para acessar a aba de configuração de serviço, configurar os serviços do qual a interface depende, que são o serviço de buffer do

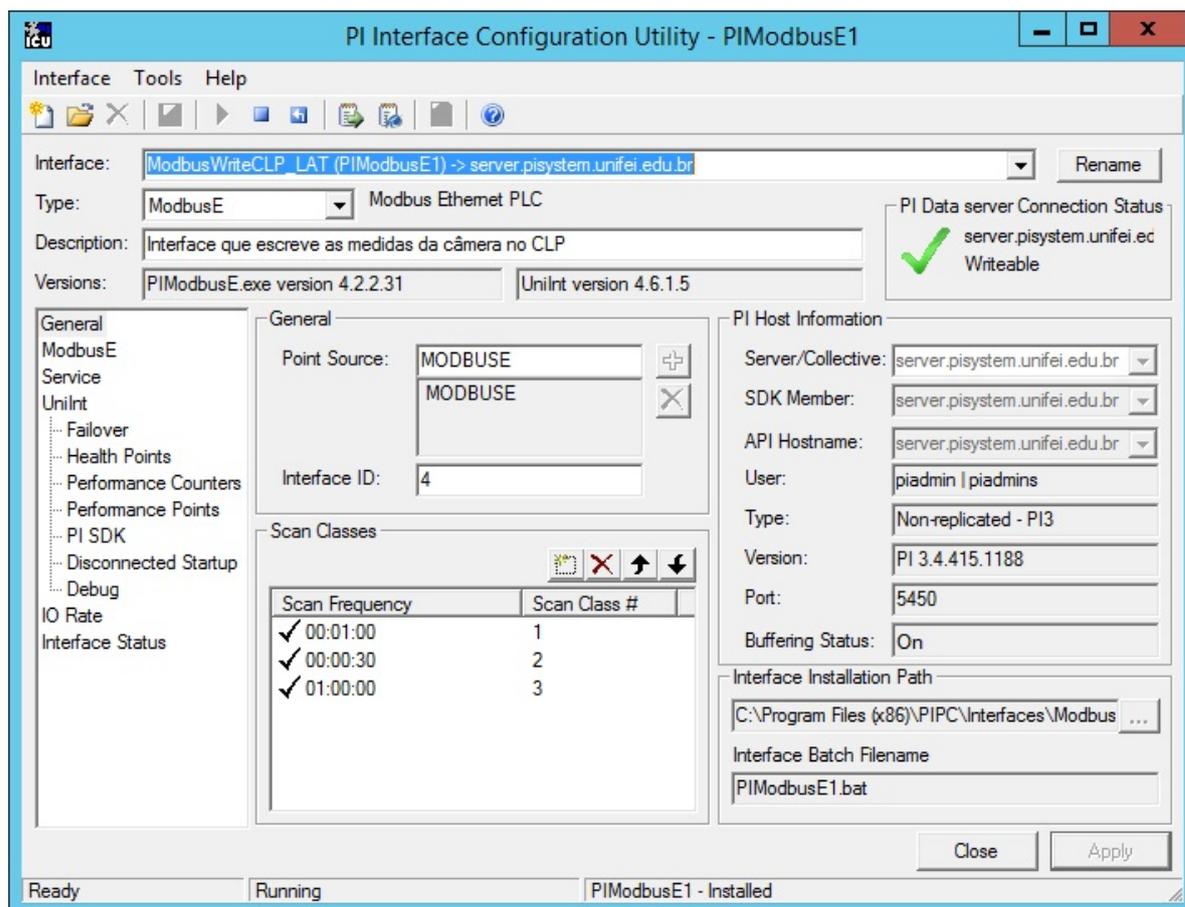


Figura 28 – Configuração de Scan classes da interface Modbus ReadWrite

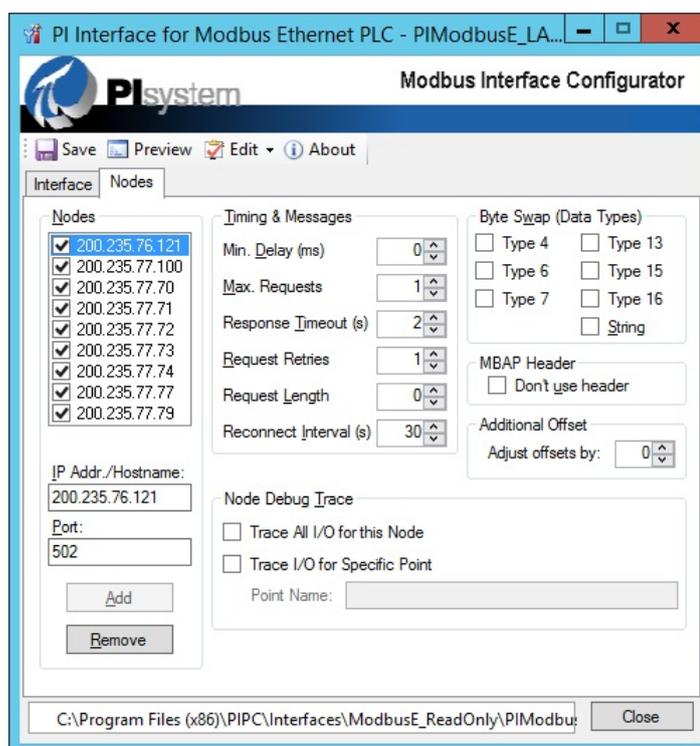


Figura 29 – Aplicativo para criação e edição do arquivo de configuração da Interface Modbus ReadOnly

PI, comunicação TCP/IP e o PI Network Manager. Deseja-se que o serviço seja executado como um usuário dedicado do domínio, criado com permissões adequadas para permitir seu correto funcionamento, portanto define-se o "Log on" por usuário de domínio e utiliza-se o usuário "piinterfaces" criado com esta finalidade, por fim cria-se o serviço através do botão "Create". A figura 30 apresenta a aba "Service" com as configurações do serviço da interface UFL utilizada. As interfaces modbus tem a mesma configuração, com exceção dos nomes de serviço e display, e do ID.

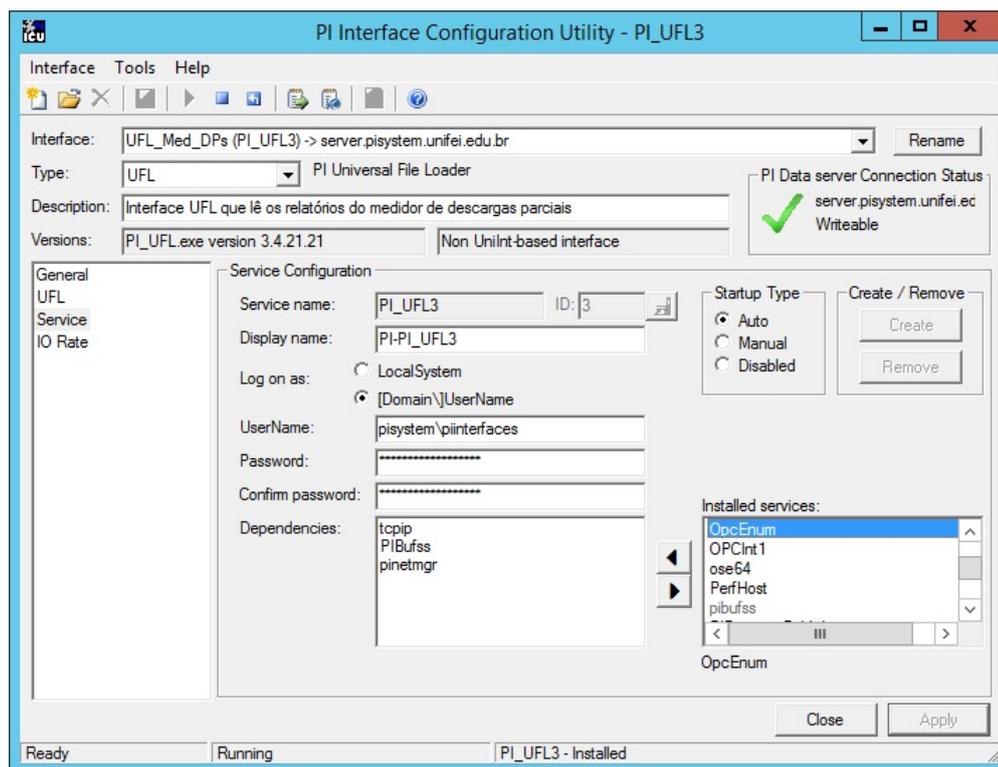


Figura 30 – Configuração de serviço da interface UFL para o medidor de descargas parciais

Depois de configuradas as interfaces, ainda foi necessário criar as tags que recebem os valores das leituras dos dispositivos Modbus (as tags referentes as leituras do Medidor de descargas parciais são criadas automaticamente pela interface UFL, o que não ocorre nas interfaces Modbus). A criação e configuração das tags pode ser feita de duas maneiras distintas: usando o PI System Management Tools (PI SMT) ou utilizando o complemento PI Builder para o Microsoft Excel.

De um modo geral pode-se dizer que a configuração de uma tag no PI requer três informações: nome, tipo de dado a ser armazenado na tag e origem do dado. A restrição quanto ao nome, é que este deve ser único e é importante utilizar um padrão para facilidade de identificação e organização das tags. Para as tags da bancada foi utilizado o prefixo "LAT" seguido do nome do dispositivo e a informação contida na tag separados por sublinhados, portanto, a tag para a temperatura mínima do box 1 da câmera, por exemplo, chama-se: "LAT_CAM1_Box1.Min".

O tipo de dado está diretamente relacionado ao dispositivo que gera os dados e deve ser configurado como tal.

Para a configuração da origem do dado de uma tag do PI a principal informação a ser definida é o Point Source, que deve ser configurado com o valor referente a configuração de Point Source da interface que se deseja usar, além disso também é necessário definir a Scan Class utilizada para atualização da tag e a instância da interface utilizada (definida pelo seu ID). Para o caso específico da interface Modbus também é necessário informar: os códigos de operação e dados do protocolo, o endereço IP do dispositivo e o endereço do registro que armazena a grandeza a ser lida.

No PI SMT para criar uma tag, deve-se selecionar "Points", e então "Point Builder" no menu a esquerda conforme visível nas figuras 31, 32 e 33. Para cada Tag existem quatro abas de configuração: "General", "Archive", "Classic" e "Security", e uma de visualização de dados do sistema: "System". Na aba "General" é definido o nome da tag, o tipo de dado o Point Source. Também é possível inserir uma descrição da tag, sua unidade de engenharia e também configurações complementares, como por exemplo se há "Swap" nos bytes do registro no dispositivo, através do parâmetro "exdesc". A figura 31 ilustra as configurações da aba "General" para a tag da temperatura mínima do box 1, no parâmetro "exdesc" é feita a configuração de "swap words" do protocolo Modbus.

Na aba "Archive" são realizadas configurações referentes ao armazenamento das leituras dentro do PI Server: "Scan" define se a interface realizará a varredura por novos valores da tag, "Archive" define se os valores vão ser armazenados no bando de dados, "Step" ativo implica na variação em degraus das leituras, "Shutdown" faz com que a tag receba o valor "Shutdown" caso o servidor esteja parado, por fim "Compressing" define se as técnicas de compressão do PI vistas em 2.4 serão aplicadas e os parâmetros "Exception Deviation" e "Compression Deviation" ajustam tais técnicas. A figura 32 ilustra a configuração da aba "Archive" para a tag da temperatura mínima do box 1.

Para a interface Modbus a aba "Classic" contém as configurações referentes ao dispositivo fonte das leituras: o parâmetro "Instrument Tag" deve receber o endereço IP do dispositivo, "Location1" corresponde ao ID da interface que realiza a leitura, "Location2" recebe o ID Modbus do dispositivo, "Location3" contém os códigos da função do protocolo e de tipo de dado a ser transmitido, com o formato: código de dado*100 + código da função. Por exemplo, para ler um dado float de um holding registro utiliza-se a função 03 e o código de dado é 6, assim, o valor a ser inserido no parâmetro fica 603. A "Location4" define a scan class utilizada para a tag, e finalmente a "Location5" contém o endereço do registro a ser lido no dispositivo. A configuração da aba "Classic" da tag da temperatura mínima do box 1 é ilustrada na figura 33.

Finalmente, a aba "Security" contém as informações de segurança da tag, ou seja, quais usuários do PI System terão acesso, e que tipo de acesso entre leitura e escrita será

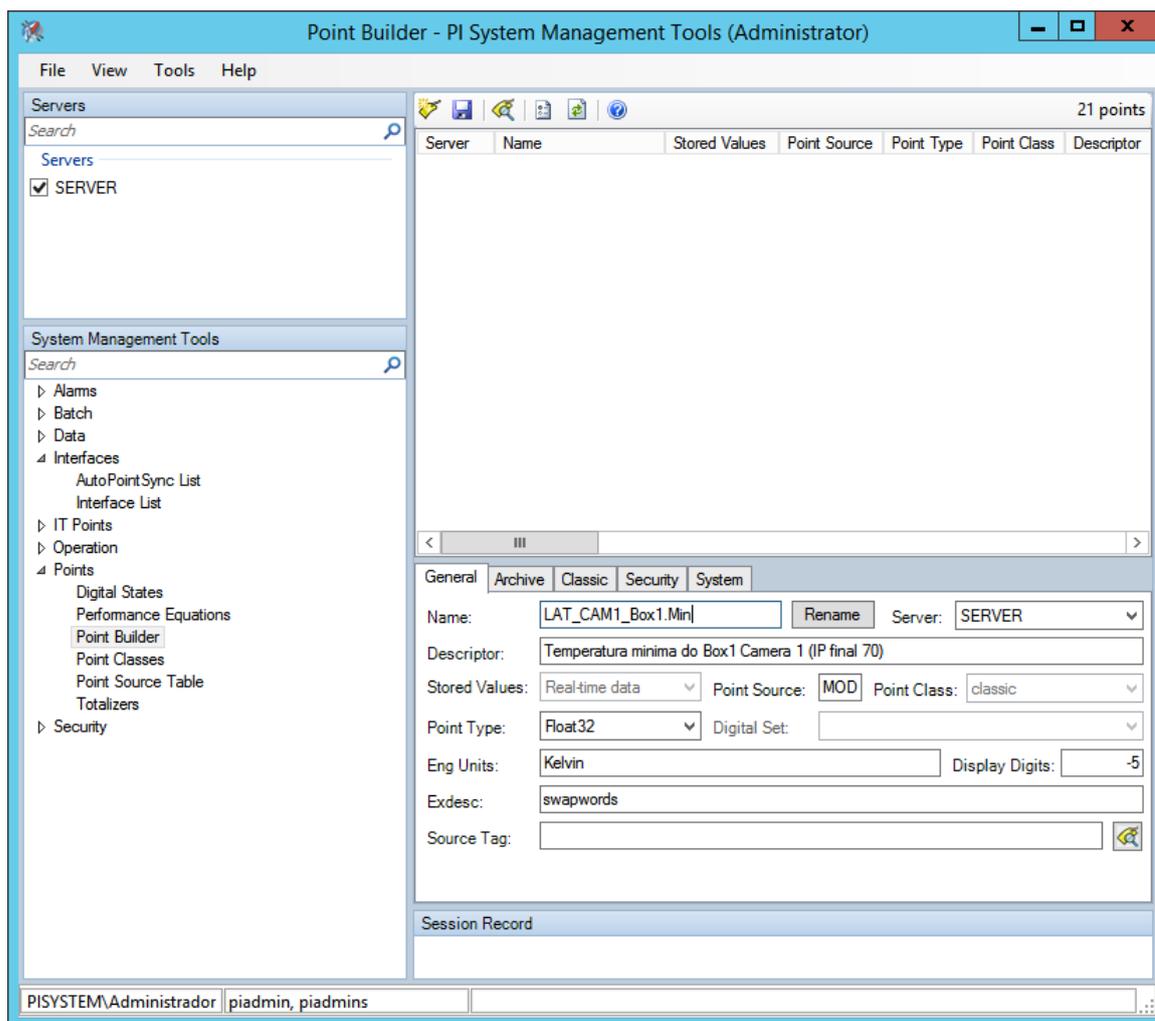


Figura 31 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "General"

garantido à tag. É possível definir se um determinado usuário poderá acessar uma tag e se ele poderá acessar seu conteúdo.

Após a criação de uma tag através do PI SMT é possível utilizar o PI Builder, complemento para Microsoft Excel disponibilizado pela OSIsoft, para facilitar a criação de múltiplas tags semelhantes. Para tanto utiliza-se o complemento para buscar a tag criada e selecionar os atributos da tag que se deseja copiar para as novas tags, e então replicar as configurações modificando o nome e os atributos de interesse, por exemplo diferentes registros de um mesmo dispositivo. Depois de realizados os ajustes basta clicar em um botão do complemento e as tags são automaticamente criadas, modificadas ou até mesmo apagadas.

Para a bancada foram criadas um total de 59 tags. A quantidade de tags por dispositivo é apresentada na tabela 11.

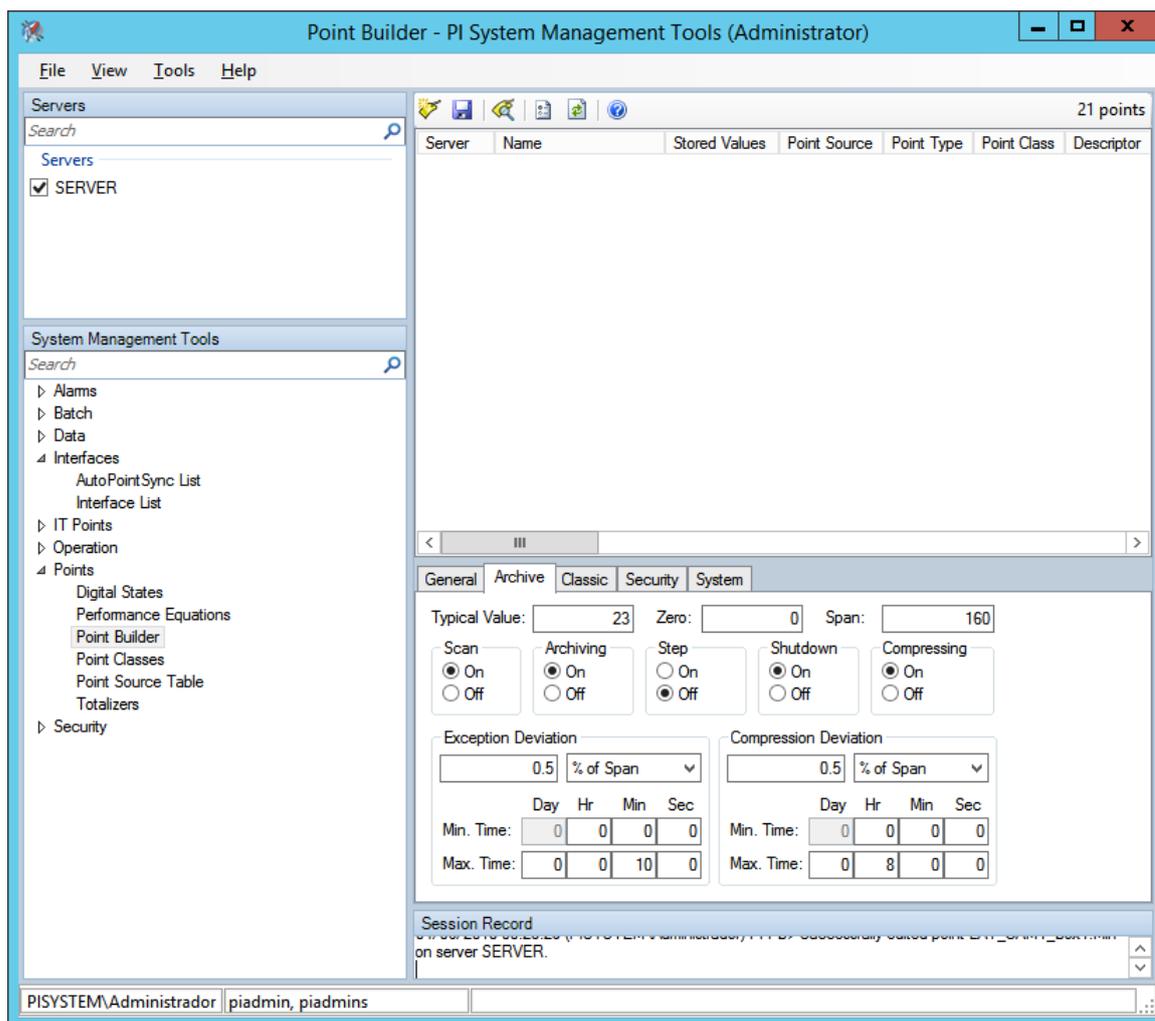


Figura 32 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "Archive"

Tabela 11 – Quantidade de tags por equipamento

| Equipamento | Quantidade de tags |
|---------------------|--------------------|
| Medidor de DPs | 3 |
| Termohigrômetro | 3 |
| Fieldlogger | 14 |
| CLP | 18 |
| Câmera termográfica | 21 |

3.4 Configuração da árvore AF, eventos e notificações no PI

Uma das principais funcionalidades do PI System em relação a outras aplicações de historiamento de dados é a possibilidade de configuração do Asset Framework (AF), que permite a organização das tags em uma estrutura de árvore e atributos que facilita a organização, análise e visualização dos dados armazenados. Dentro dessa estrutura desenvolvida no AF, é possível criar e também rastrear eventos que facilitam a interpretação dos dados, bem como notificações a usuários sobre o status de funcionamento dos

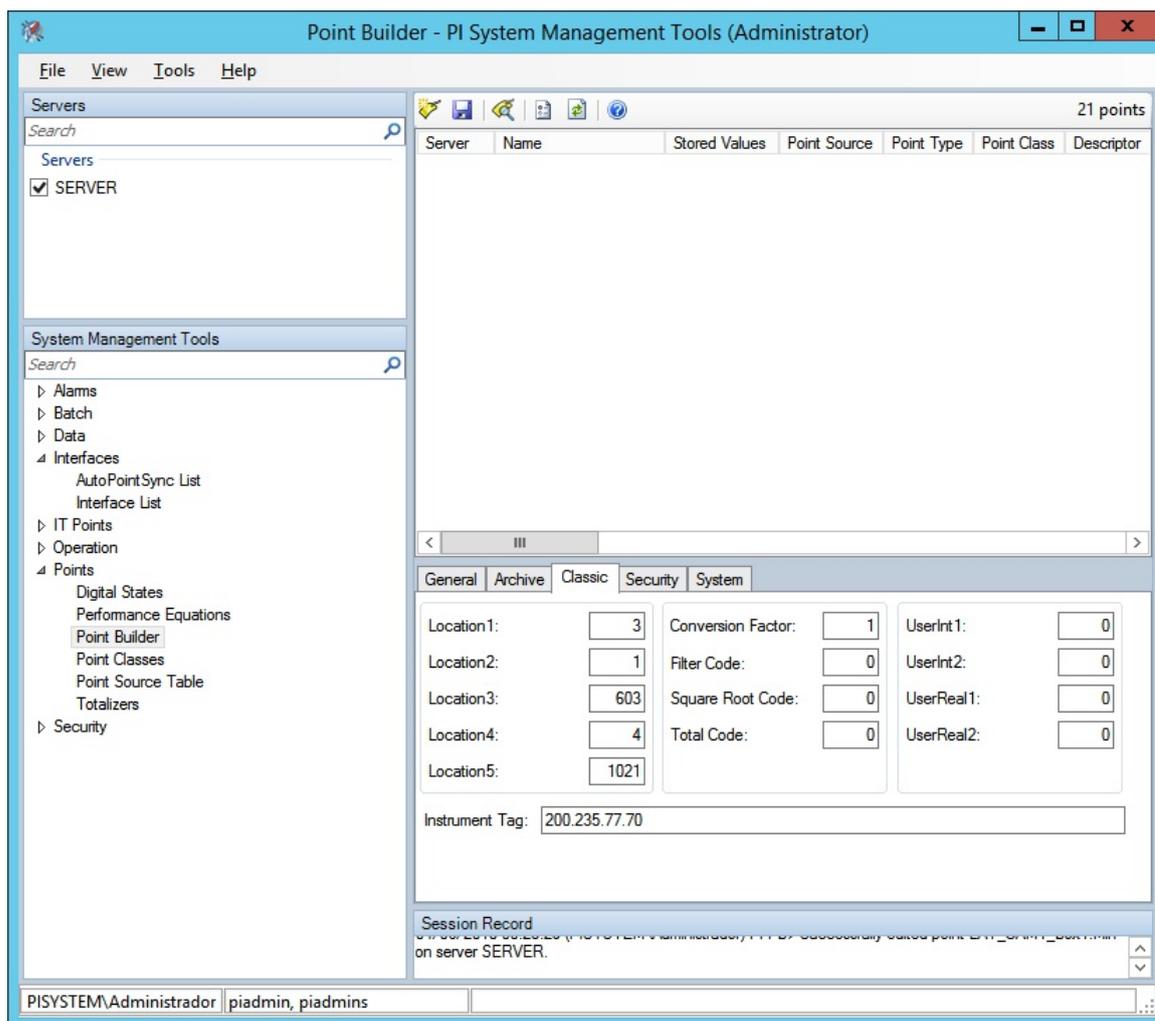


Figura 33 – Configuração de tag no PI SMT - Aba "Classic"

dispositivos.

A UNIFEI utiliza o PI em diferentes projetos e tem, portanto, uma árvore AF configurada para utilização em tais projetos. Para a bancada foi criado, dentro de tal árvore AF da UNIFEI, um nó denominado "LAT - CEMIG" para conter todos os dispositivos da bancada. Para criar e configurar o AF é necessário utilizar o PI System Explorer (PI SE). A figura 34 ilustra a árvore com os elementos criados para cada um dos dispositivos monitorados.

Cada elemento referente a um dispositivo abriga os seus atributos que podem ser tags ou atributos estáticos - como dados de placa, por exemplo. A figura 35 apresenta os atributos criados para o Fieldlogger, onde os atributos: "Alta do transdutor de corrente", "Baixa do transdutor de corrente", "Offset transdutor de corrente", "TC Alta" e "TC Baixa", são atributos estáticos correspondentes aos dados nominais do transdutor de corrente e TC utilizados. Por sua vez, os atributos "Corrente induzida na barra", "Delta-Temp", "DeltaAvgTemp" e "Media_termopar", são atributos obtidos diretamente através de cálculos utilizando as tags do dispositivo. Os demais atributos todos correspondem a

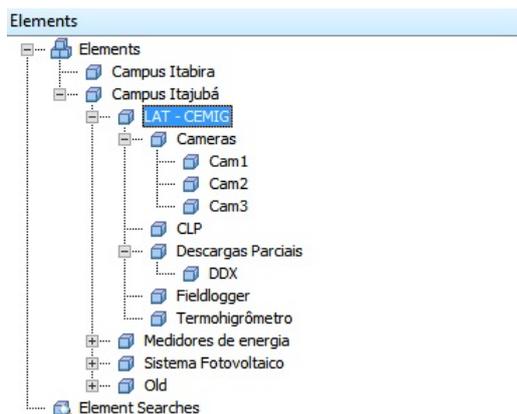


Figura 34 – Árvore AF para a bancada criada no PI System Explorer

tags de leitura.

| Name | Value |
|---------------------------------|-------------|
| Alta do Transdutor de Corrente | 5 A |
| Baixa do Transdutor de Corrente | 16 mA |
| Corrente induzida na barra | 0 A |
| DeltaAvgTemp | 0 °C |
| DeltaTemp | 0 °C |
| Leitura de corrente (real) | 4,004091 mA |
| Leitura de Corrente(int) | 4 mA |
| media_termopar | -1 °C |
| Offset Transdutor de corrente | 4 mA |
| TC Alta | 2500 A |
| TC Baixa | 5 A |
| Termopar1_int | -1 °C |
| Termopar1_real | -1 °C |
| Termopar2_int | -1 °C |
| Termopar2_real | -1 °C |
| Termopar3_int | -1 °C |
| Termopar3_real | -1 °C |
| Termopar4_int | -1 °C |
| Termopar4_real | -1 °C |
| Termopar5_int | -1 °C |
| Termopar5_real | -1 °C |

Figura 35 – Atributos criados para o Fieldlogger

Além disso é possível organizar os atributos através de categorias. A figura 36 apresenta os atributos do termohigrômetro organizados através de categorias. Procedimento semelhante foi adotado para cada um dos elementos, criando os atributos necessários, vinculando-os as tags e organizando-os em categorias para facilidade de entendimento.

Depois de criada a árvore AF foram desenvolvidas algumas funcionalidades para

The screenshot shows a software window titled 'Termohigrômetro' with several tabs: 'General', 'Child Elements', 'Attributes', 'Ports', 'Analyses', 'Notification Rules', and 'Version'. The 'Attributes' tab is active, displaying a table of attributes. The table has a 'Filter' bar at the top and a 'Name' column with a search icon. The attributes are grouped into two categories: 'Cálculos' and 'Leitura'.

| Name | Value |
|---------------------------|---------|
| Category: Cálculos | |
| Ponto de Orvalho | 12,1 |
| Temperatura | 16,8 °C |
| Umidade | 73,8 % |
| Category: Leitura | |
| Ponto de Orvalho x10 | 121 |
| Temperatura x10 | 168 °C |
| Umidade x10 | 738 % |

Figura 36 – Atributos do termohigrômetro organizados por categorias

o monitoramento do ensaio: a implementação de eventos correspondentes aos semiciclos de aquecimento e resfriamento, bem como notificações de falhas na operação do ensaio.

Com a finalidade de facilitar a análise dos dados da bancada foram criados “Event Frames” (EFs) dentro do PI Asset Framework (PI AF), estes EFs correspondem a intervalos específicos onde uma determinada condição é observada, permitindo que atributos de interesse possam ser facilmente monitorados durante tal intervalo. No caso do ensaio de ciclos térmicos, foram criados dois EFs: um para o monitoramento do aquecimento, e outro para o resfriamento.

Por enquanto o único atributo monitorado no EF é sua duração, durante a fase de análise dos resultados e desenvolvimento dos modelos matemáticos de previsão de vida útil (atualmente em curso) serão analisados também quais os atributos de interesse a serem incluídos aos EFs.

Para criar um EF no PI AF é necessário primeiro criar um template para ele, configurando seu nome e os atributos que possuirá (dados que podem ser alterados no template conforme eventual necessidade), e depois criar uma análise de geração de EF. Na criação da análise, define-se o template de EF que será utilizado, e também as condições de gatilho para início e fim dos eventos.

Para o aquecimento os gatilhos de início e fim do evento são, respectivamente: corrente induzida na barra maior que 100A; e temperatura média na barra acima de 10°C do limite superior definido para o ensaio ou corrente induzida na barra menor que 100A. Enquanto isso, para o resfriamento os gatilhos de início e fim do evento são, respectivamente: corrente induzida na barra menor que 100A; e temperatura média na barra abaixo de 5°C do limite superior definido para o ensaio ou corrente induzida na barra maior que 100A. A figura 37 apresenta a tela com as análises ilustrando os gatilhos do EF de aquecimento.

O monitoramento do ensaio de resistência a tensão, também é realizado através

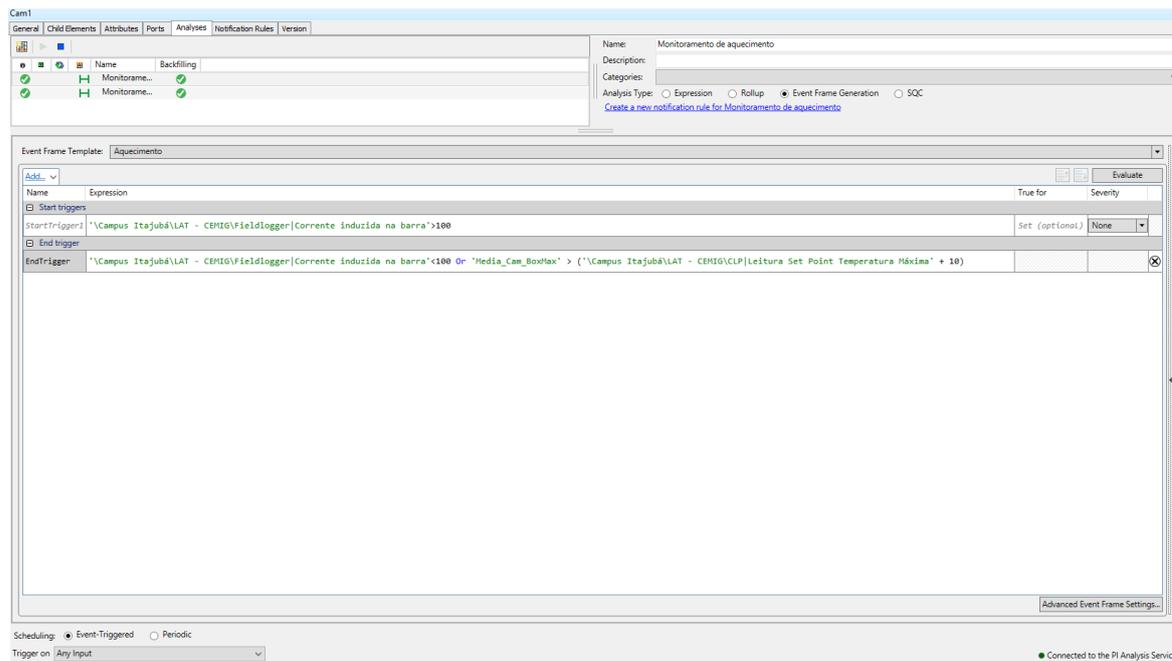


Figura 37 – Configuração da análise de geração dos EFs de monitoramento de aquecimento

de EF, que permanece ativo enquanto a barra sob ensaio permanecer alimentada.

Foi criado um sistema de notificações capaz de informar aos operadores e responsáveis sobre eventuais problemas na transmissão dos dados. O PI System oferece essa funcionalidade através do PI Notifications, através do qual é possível configurar o disparo de notificações via e-mail ou SMS quando determinados eventos são detectados no PI System.

Na configuração da notificação é possível: definir o formato da mensagem, apresentar valores de atributos/tags do PI no momento de disparo, o elemento (dispositivo) que originou a condição de gatilho para a notificação, horário exato da ocorrência, entre outras informações sobre o processo, bem como definir os destinatários das notificações. Todas estas configurações podem ser feitas para cada regra de notificação criada, de forma individual, de forma que é possível criar diversas notificações com diferentes configurações e destinatários. De forma análoga aos EFs, é necessário criar ou vincular uma análise para o gerenciamento dos gatilhos de disparo das notificações.

Para identificar falhas de comunicação é necessário verificar, através de análise se o tempo desde o registro de dados excede o tempo padrão entre dois registros subsequentes. Tal verificação é feita pelo comando: “PrevEvent(‘nome_do_atributo’, ‘*’) < ‘*-10m’”, onde o comando PrevEvent indica uma timestamp de um registro de dados em determinado atributo, deve-se inserir o nome do atributo que se deseja monitorar e o instante de interesse. O comando ‘*’ indica ao PI que o tempo de interesse é o instante atual, enquanto o comando ‘*-10m’ indica ao PI que se deseja a timestamp do instante ocorrido

10 minutos atrás.

Desta forma, o comando da análise para o gatilho da notificação pode ser lido como: a timestamp do último valor registrado no atributo é anterior a timestamp de 10 minutos atrás. Tal abordagem foi empregada na bancada de ensaios, para informar falhas na comunicação do PI System com: o CLP, a câmera e o medidor de descargas parciais.

Também foram criadas notificações para condições anômalas de operação do ensaio de ciclos térmicos, ou seja, o operador do ensaio recebe notificação caso a temperatura saia da zona de controle definida pelos limites superior e inferior. Existem duas notificações para cada limite: uma que informa uma diferença pequena entre o limite e valor medido, e outra que informa uma diferença maior.

Há ainda uma notificação para o ensaio de resistência a tensão informando aos operadores o instante em que a alimentação é interrompida.

4 Procedimentos dos ensaios realizados na bancada

A bancada foi desenvolvida para a realização de três diferentes ensaios de descargas parciais: 1000 horas sob tensão aplicada, ciclos térmicos com tensão aplicada e de resistência a tensão. Cada um destes ensaios tem seus requisitos e particularidades e seu procedimento é descrito a seguir.

4.1 Ensaio de 1000 horas sob tensão aplicada

O ensaio de mil horas sob tensão aplicada é um dos ensaios de envelhecimento realizados na bancada. Nele, uma amostra de barra de estator é posicionada na cela de ensaios e submetida à mil horas de tensão aplicada em frequência industrial.

Os ensaios são aplicados a barras individuais que estando fora do estator são envolvidas por uma camada condutora (papel alumínio) em todo o trecho retilíneo, e conectada ao ponto de terra. Desta forma, a tensão aplicada encontra-se entre o condutor e a camada condutora aterrada que representa eletricamente o estator do gerador. A execução deste ensaio é tomada em duas fases:

- 1ª. Aplicação de 1 p.u. da tensão nominal de fase terra da barra, $7967 \text{ V } (13,8/\sqrt{3} \text{ kV})$;
- 2ª. Aplicação de 2 p.u. da tensão nominal de fase terra da barra, 16 kV.

Em ambas as fases a diferença de potencial fica toda em cima da isolação sólida da barra sob ensaio. Durante todo o ensaio a bancada permite o monitoramento online do nível de descargas parciais através do capacitor de acoplamento. Ao final de cada uma das duas etapas pode ser realizada a análise da evolução das descargas parciais durante o ensaio.

Neste ensaio são monitorados pela bancada: condições ambientais, tensão aplicada à barra, e taxa e intensidade de descargas parciais. Desta forma os equipamentos utilizados são: fonte de tensão, termohigrômetro e medidor de descargas parciais.

4.2 Ensaio de ciclos térmicos

O ensaio de ciclos térmicos representa um importante ensaio de envelhecimento acelerado e simula o estresse termomecânico incidente nos geradores. Neste ensaio uma

amostra de barra de estator é posicionada na cela de ensaios e submetida a corrente elétrica que provocará seu aquecimento pelo efeito Joule. Quando o interior da barra atinge uma determinada temperatura, especificada pela classe térmica da barra, a corrente elétrica é retirada e inicia-se o resfriamento da barra. Tal resfriamento pode ser acelerado pela utilização de ventiladores ou pode-se deixar a barra resfriar naturalmente.

No momento em que a temperatura no interior da barra atinge 40°C, finaliza-se o resfriamento e inicia-se novo aquecimento da barra, começando outro ciclo térmico. Segundo a norma IEE std 1310, devem ser aplicados 500 ciclos térmicos a barra, ou tantos quanto forem necessários para que ela falhe. A taxa de variação de temperatura sugerida por essa norma é 2.5 °C (+/- 1.0 °C na média) por minuto. Ou seja, considerando uma barra classe térmica F (155 °C) e uma taxa de variação de temperatura de 2,5 °C por minuto, o ciclo térmico gerado deve estar entre as temperaturas de 155 °C a 40 °C e durar em torno de 90 minutos, sendo 45 minutos para o aquecimento da barra, e 45 minutos para o resfriamento da barra.

Diferentemente do que a norma IEE std 1310 sugere, a bancada desenvolvida permite que os ensaios de ciclos térmicos sejam realizados com tensão nominal aplicada a barra, com a finalidade de registrar a evolução das descargas parciais durante todo o ensaio. Assim, um procedimento semelhante ao ensaio de tensão aplicada pode ser realizado: a barra sob teste deve ser envolvida por uma camada condutora (papel alumínio) em todo o trecho retilíneo, e conectada ao ponto de terra. Desta forma, a tensão aplicada se encontrará entre o condutor e a camada condutora aterrada que representa eletricamente o estator do gerador. Assim a diferença de potencial fica toda em cima da isolamento sólida da barra sob ensaio possibilitando o monitoramento online do nível de descargas parciais através do capacitor de acoplamento, durante todo o ensaio.

Neste ensaio são monitorados: condições ambientais, tensão aplicada e corrente induzida na barra, temperaturas em sua superfície, e taxa e intensidade de descargas parciais. Todos os equipamentos instalados na bancada e descritos na seção 3.2 são utilizados, sendo que os termopares são utilizados apenas em ensaio experimental para determinação da relação entre as temperaturas interna e externa.

4.2.1 Ensaio experimental de Ciclos térmicos

Como previamente mencionado, o procedimento da norma para o ensaio de ciclos térmicos estabelece que a temperatura no interior do isolamento deve variar entre 40°C e 155°C. Normalmente, essas medições são feitas com a inserção de sondas de medição (termopares, fibra-ótica ou outro tipo de sensor) através de furos no isolamento.

Uma vez que propõe-se a realização do ensaio de ciclos térmicos com medição de descargas parciais, isso implica na aplicação de tensão durante os ciclos térmicos, desta

forma o isolamento da barra não pode ser furado e assim, é impossível obter diretamente a temperatura em seu interior, faz-se necessária, portanto, a obtenção da temperatura interna através da temperatura na superfície externa do isolamento.

A temperatura na superfície é monitorada com a utilização das câmeras de termovisão e realizou-se um estudo em barra teste sem aplicação de tensão, para verificar o comportamento da diferença entre as temperaturas obtidas pelos termopares e a câmera.

Dado que a barra de testes não seria submetida a aplicação de tensão, foi possível furá-la e instalar termopares para obter a temperatura interna e permitir a comparação com a temperatura externa, analisar tais dados e obter eventual relação entre as temperaturas observadas.

Para a obtenção da temperatura na superfície via câmeras de termovisão, foram realizados os procedimentos descritos na seção 3.2.9: escolha de cinco pontos ao longo da barra e criação dos boxes para cobrir tais pontos, utilização de fita isolante fosca para obtenção de superfície de alta emissividade e posicionamento dentro do alcance de 2,85m calculado para o modelo de câmera de termovisão utilizado.

Para a obtenção da temperatura interna, foram realizados pequenos furos no isolamento da barra, nos mesmos 5 pontos cobertos de fita isolante, para a inserção de 5 pontas de medição dos termopares tipo K no cobre. Tal configuração permite a comparação entre a temperatura interna e externa da barra, naqueles 5 pontos.

Todos os dados de leitura de temperatura foram obtidos via comunicação Modbus TCP/IP. As leituras da câmera foram obtidas de forma direta enquanto os termopares foram conectados ao Fieldlogger que teve 5 de suas entradas analógicas configuradas como sinal de termopar do tipo K. As leituras obtidas foram então incorporadas ao PI e o CLP foi utilizado para gerar e monitorar os ciclos de aquecimento e resfriamento.

Então foram realizados ensaios de aquecimento com a indução de corrente de 500A e resfriamento natural da barra, e notou-se que os tempos de aquecimento e resfriamento eram bastante diferentes entre si, conforme o gráfico da figura 38. O procedimento da norma de ensaio prevê que os tempos de resfriamento e aquecimento devem ser próximos e devem ter uma variação de temperatura entre 1,5°C e 3,5°C por minuto. Desta forma decidiu-se pela utilização de um soprador para aceleração do resfriamento e aumento da corrente de forma a ajustar os tempos para atender as exigências da norma.

Depois de finalizados os ajustes dos tempos de aquecimento e resfriamento, foram realizados diversos ciclos para permitir a análise da variação no comportamento das temperaturas ao longo do ensaio e conseqüentemente permitir a extração da relação entre a temperatura interna e na superfície externa do isolamento. Com esta configuração e devido a distância entre os pontos de medição na barra ser pequena (cerca de 30cm) em termos de propagação de calor, esperava-se uma uniformidade entre a variação da

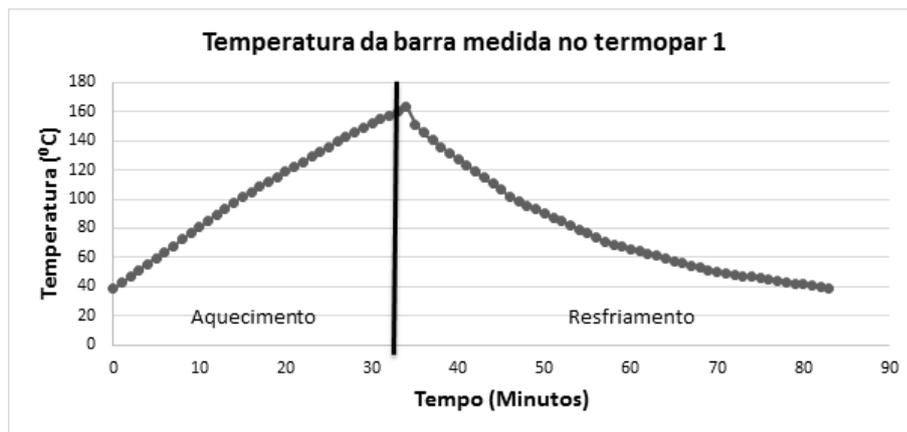


Figura 38 – Temperatura medida pelo termopar 1 durante um ciclo de aquecimento e resfriamento

temperatura nos cinco pontos, comprovada pelos gráficos das figuras 4.2 e 4.3.

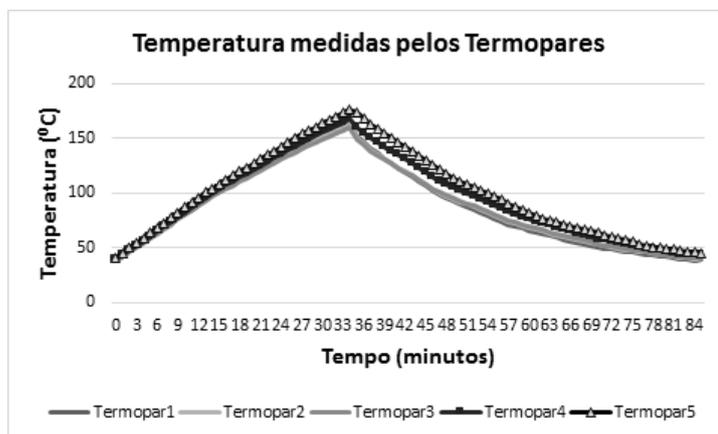


Figura 39 – Temperaturas medidas pelos termopares durante um ciclo de aquecimento e resfriamento

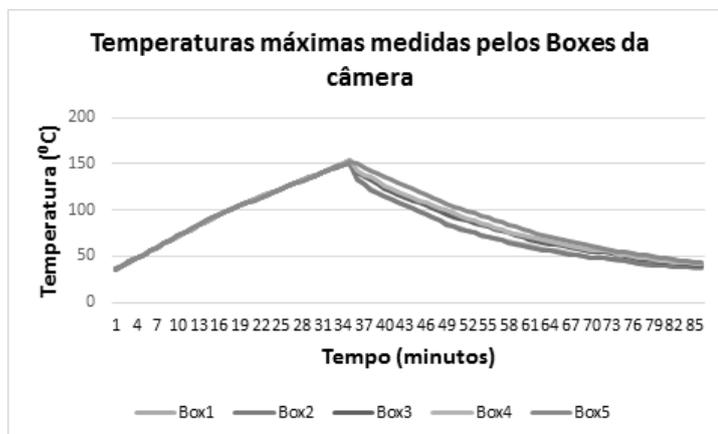


Figura 40 – Temperaturas máximas medidas pelos boxes das câmaras durante um ciclo de aquecimento e resfriamento

Desta forma optou-se pela utilização da média das temperaturas dos termopares, em comparação com a média das temperaturas máximas de cada box. A figura 4.4 apre-

senta um gráfico comparando as temperaturas médias obtidas pelos termopares e pela câmera, bem co-mo a diferença (delta) entre elas, é possível observar que o delta varia bastante de acordo com a temperatura, mas apresenta variação pequena entre diferentes ciclos.

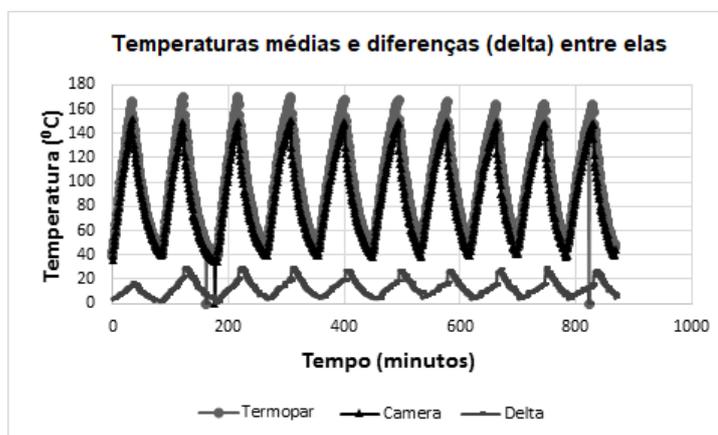


Figura 41 – Comparação entre as médias de temperatura medidas via termopar e câmera e o delta entre elas

Com os dados de vários ciclos é possível identificar os horários em que os ciclos de aquecimento e resfriamento terminavam e então comparar as temperaturas máximas e mínimas medidas pelos termopares, pela câmera e a diferença entre elas nesses pontos, de modo a determinar as temperaturas de superfície equivalentes as temperaturas internas de 40°C e 155°C. As tabelas 12 e 13 apresentam a comparação entre as temperaturas internas (termopar) e na superfície de isolamento (câmera), bem como a diferença entre elas (delta) nos instantes de término dos ciclos de resfriamento e aquecimento.

Tabela 12 – Tabela de comparação da temperatura nos horários de término de resfriamento

| <i>Término do ciclo</i> | <i>Termopar</i> | <i>Câmera</i> | <i>Delta</i> |
|-------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| 16-fev-18 11:10:17 | 42,69 | 39,80 | 2,89 |
| 16-fev-18 12:38:00 | 43,90 | 38,35 | 5,55 |
| 16-fev-18 14:11:13 | 42,79 | 39,23 | 3,56 |
| 16-fev-18 15:40:09 | 44,75 | 39,38 | 5,37 |
| 16-fev-18 17:14:13 | 43,06 | 38,82 | 4,25 |
| 16-fev-18 18:38:10 | 47,55 | 41,25 | 6,30 |
| 16-fev-18 20:02:00 | 44,81 | 39,02 | 5,79 |
| 16-fev-18 21:24:14 | 46,45 | 41,13 | 5,32 |
| 16-fev-18 22:49:46 | 44,30 | 40,54 | 3,75 |
| 17-fev-18 00:12:00 | 46,10 | 39,43 | 6,66 |
| Média | 44,64 | 39,70 | 4,94 |
| Desvio padrão | 1,64 | 0,98 | 1,26 |

Pode-se observar que as temperaturas internas nos momentos de término dos ciclos de resfriamento apresentou um erro de aproximadamente 5 °C em relação ao target de 40°C, assim como o delta entre as temperaturas também apresentou variação média de 5 °C.

Tabela 13 – Tabela de comparação da temperatura nos horários de término de aquecimento

| <i>Término do ciclo</i> | <i>Termopar</i> | <i>Câmera</i> | <i>Delta</i> |
|--------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
| 16-fev-18 10:15:10 | 155,14 | 141,74 | 13,40 |
| 16-fev-18 11:41:25 | 155,03 | 136,10 | 18,93 |
| 16-fev-18 13:16:30 | 155,28 | 138,03 | 17,24 |
| 16-fev-18 14:44:53 | 155,06 | 138,10 | 16,97 |
| 16-fev-18 16:18:18 | 155,45 | 137,73 | 17,71 |
| 16-fev-18 17:51:05 | 154,89 | 139,71 | 15,18 |
| 16-fev-18 19:17:00 | 155,43 | 140,40 | 15,03 |
| 16-fev-18 20:43:26 | 155,41 | 140,80 | 14,60 |
| 16-fev-18 22:05:01 | 155,44 | 141,12 | 14,32 |
| 16-fev-18 23:29:30 | 154,89 | 142,16 | 12,73 |
| Média | 155,20 | 139,56 | 15,61 |
| Desvio padrão | 0,23 | 2,00 | 2,01 |

Para o aquecimento o erro da temperatura interna em relação ao target foi bem menor, sendo sempre menor que 0,5 °C, enquanto que o delta entre as temperaturas interna e externa foi maior: aproximadamente 15 °C.

Considerando que os desvios padrão de ambos os ciclos foram pequenos, é possível adotar os limites de operação no ensaio com aplicação de tensão (que serão obtidos apenas através das medidas da câmera) como a subtração do target pelo delta obtido. Desta forma as temperaturas externas de 35°C e 140°C equivalem as temperaturas internas de 40°C e 155°C respectivamente, e portanto devem ser adotadas como limites de operação.

Para iniciar o ensaio de ciclos térmicos com tensão aplicada era necessário ajustar o CLP para monitorar as leituras de temperatura da câmera e realizar o controle do ensaio com as temperaturas obtidas, então tentou-se realizar a comunicação direta entre CLP e câmera. Tal comunicação não foi possível pois o mapeamento Modbus da câmera utiliza endereçamento de 6 dígitos e o CLP utilizado precisaria de um módulo adicional para permitir a comunicação com esse tipo de dispositivo.

Como solução para tal problema decidiu-se pela utilização da PI Interface for Modbus Ethernet ReadWrite, capaz de escrever em registros do CLP via Modbus: toda vez que as tags do PI de leituras das máximas temperaturas de cada box recebem um novo valor, a interface do PI escreve em cinco registros do CLP, correspondentes as tags de temperatura máxima de cada box, a média das temperaturas é então calculada no

CLP e utilizada no controle do ensaio.

Realizados todos esses ajustes o ensaio de ciclos térmicos pôde finalmente ser iniciado.

4.3 Ensaio de resistência a tensão

O ensaio de resistência a tensão (Voltage Endurance Test) consiste em aplicar uma tensão bem acima da nominal na barra e registrar o tempo até a falha. O ensaio é abordado na norma IEEE 1043 que reporta uma tensão de 30kV ou 35kV para barras com tensão nominal de 13,8 kV, com duração de 400 horas ou 250 horas, respectivamente. O objetivo do ensaio é relacionar o desgaste que a barra já teve em seu uso (pois as barras só passam por esse teste depois que já foram submetidas a um ensaio) com o tempo até a falha da barra. Ou seja, o ensaio de resistência a tensão pode ser utilizado como um ensaio de diagnostico, que tem a finalidade de avaliar a condição da barra sob teste.

Além da tensão aplicada na barra, este ensaio pode conter também uma fonte de aquecimento para o desenvolvimento do ensaio sob temperatura normal de operação. Isto é, para uma barra classe F, a temperatura normal de operação é tipicamente entre 110 e 120°C. Porém, muitos fabricantes desenvolvem esse ensaio sem a aplicação de tal fonte de aquecimento.

Neste ensaio a bancada monitora apenas o tempo entre a energização da barra e o desligamento causado pelo acionamento da proteção no momento de ruptura da barra.

Com o objetivo de detectar a energização da barra foi utilizada a saída de baixa tensão da fonte (onde 1pu na saída de alta tensão, corresponde a cerca de 50V) para atuar a bobina de um contator, cujo contato normalmente aberto conecta um ponto de sinal digital +24V disponível no módulo do CLP à uma entrada digital do CLP. Enquanto isso, a saída de alta tensão alimenta as barras sob ensaio. A ligação das barras é feita de maneira semelhante ao ensaio de 1000 horas sob tensão aplicada.

A figura 42 ilustra o circuito desenvolvido. Desta forma, enquanto a fonte fornecer tensão ao circuito, o contator permanecerá atuado e a entrada do CLP terá nível lógico 1, quando a proteção atuar e a tensão fornecida cair a 0, o contator volta a condição sem atuação, e a entrada do CLP terá nível lógico 0.

No programa o bloco de dados de buffer do Modbus (o bloco de dados com variáveis do tipo Real que contém os registros de leitura e escrita Modbus) possui um registro que recebe o valor 0,0 enquanto a entrada digital utilizada para o ensaio de resistência a tensão tiver nível lógico 0, e o valor 1,0 quando o nível lógico de tal entrada for 1. Tal registro é monitorado pelo PI System via interface Modbus, escrevendo o valor lido em uma tag.

Desta forma, através do PI será possível identificar o momento exato da falha e

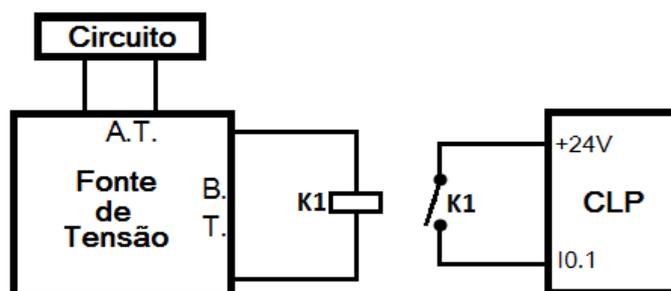


Figura 42 – Esquemático do circuito para monitoramento do ensaio de resistência a tensão

o tempo durante o qual a barra permaneceu energizada antes de tal falha ocorrer. Para facilitar a identificação do status do ensaio, foi realizada uma mudança na tela IHM e nas telas de monitoramento do ensaio, para incluir essa informação como pode ser observado na figura 43. Também foi desenvolvida no PI uma análise de notificação que informará aos operadores do ensaio o momento da falha.

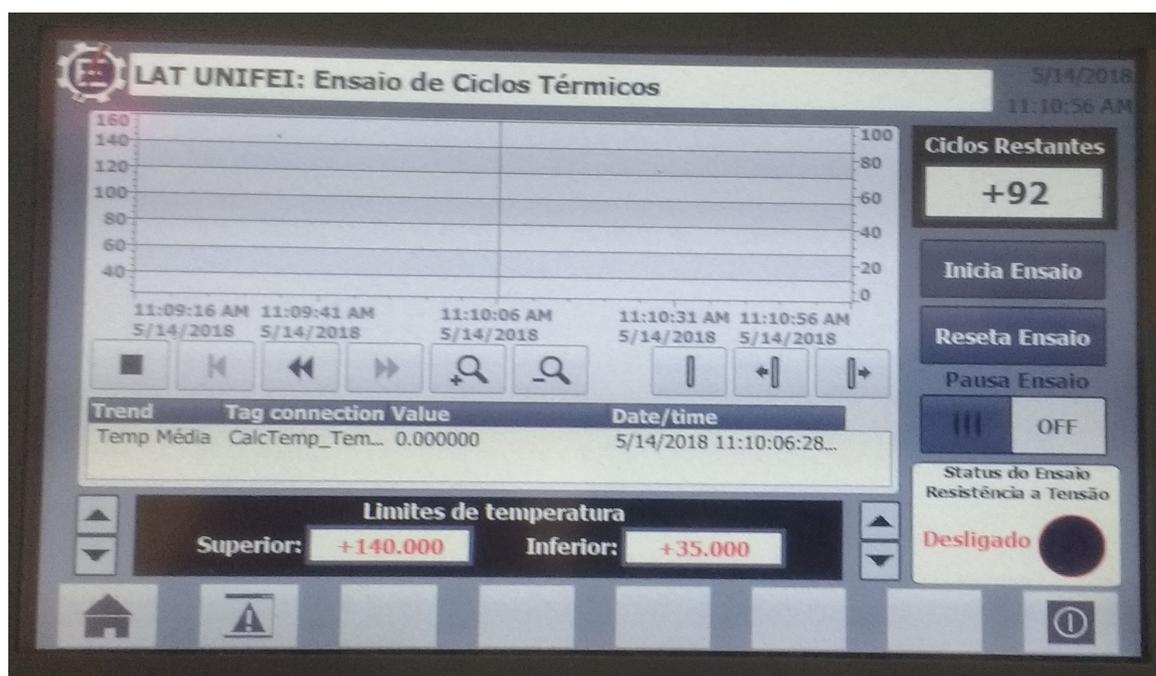


Figura 43 – Tela IHM para o monitoramento do ensaio de ciclos térmicos com quadro de status do ensaio de resistência a tensão

No quadro de status do ensaio de resistência a tensão, localizado no canto inferior direito aparecerá o texto ligado na cor verde ou desligado na cor vermelha, e um círculo que pode estar verde e piscando ou vermelho sólido, conforme o estado do ensaio varia entre ligado e desligado, respectivamente.

5 Resultados e funcionamento

A bancada foi desenvolvida visando, principalmente, atender a demanda do projeto de pesquisa "Proposta de uma abordagem para diagnóstico e avaliação de vida útil de geradores", desta forma, a sequência de realização de ensaios é determinada pela equipe do projeto.

5.1 Ensaios de 1000 horas sob tensão aplicada

Os dois primeiros ensaios realizados na bancada foram ensaios de 1000 horas sob diferentes tensões aplicadas, porém utilizando outro medidor de descargas parciais, modelo HydroTracII da IRIS Power, que dentro do projeto de pesquisa foi enviado para a Usina de Emborcação, sendo então substituído na bancada pelo Medidor DDX 9121b da Haefely.

Para a realização das análises dos dados foi utilizado o PI DataLink, add-on do PI System desenvolvido para o Microsoft Excel e o PI Analysis foi utilizado para preparação dos dados, quando necessário.

5.1.1 Ensaio de 1000 horas sob tensão de 8kV (1 pu) aplicada

No primeiro ensaio realizado foi necessário ajustar o medidor de descargas parciais durante a operação e houve um problema na configuração de sensibilidade que fez com que as leituras de descargas parciais de parte significativa do ensaio fosse zerada. Além disso, os dispositivos para monitoramento da tensão ainda não estavam instalados. A figura 44 apresenta os resultados da intensidade da descarga parcial (Q_m) em milivolts (mV), com ocorrência em semiciclos positivos ($+Q_m$) e negativos ($-Q_m$) em função do tempo de ensaio.

Para verificar se há alguma tendência na variação das descargas parciais em função do tempo neste ensaio, foi aplicada a técnica de média móvel com janela igual a 25, para ambos os valores de Q_m , conforme ilustram as figuras 45 e 46.

A análise via média móvel não indicou qualquer tendência significativa de variação na intensidade das descargas do semiciclo positivo, porém para os semiciclos negativos, há aparente redução da intensidade a partir da marca de 250 horas de registro do ensaio.

5.1.2 Ensaio de 1000 horas sob tensão de 16kV (2 pu) aplicada

O ensaio seguinte também foi de mil horas sob tensão aplicada, porém com tensão de 16kV, equivalente ao dobro da tensão nominal da barra, ainda sem monitoramento da

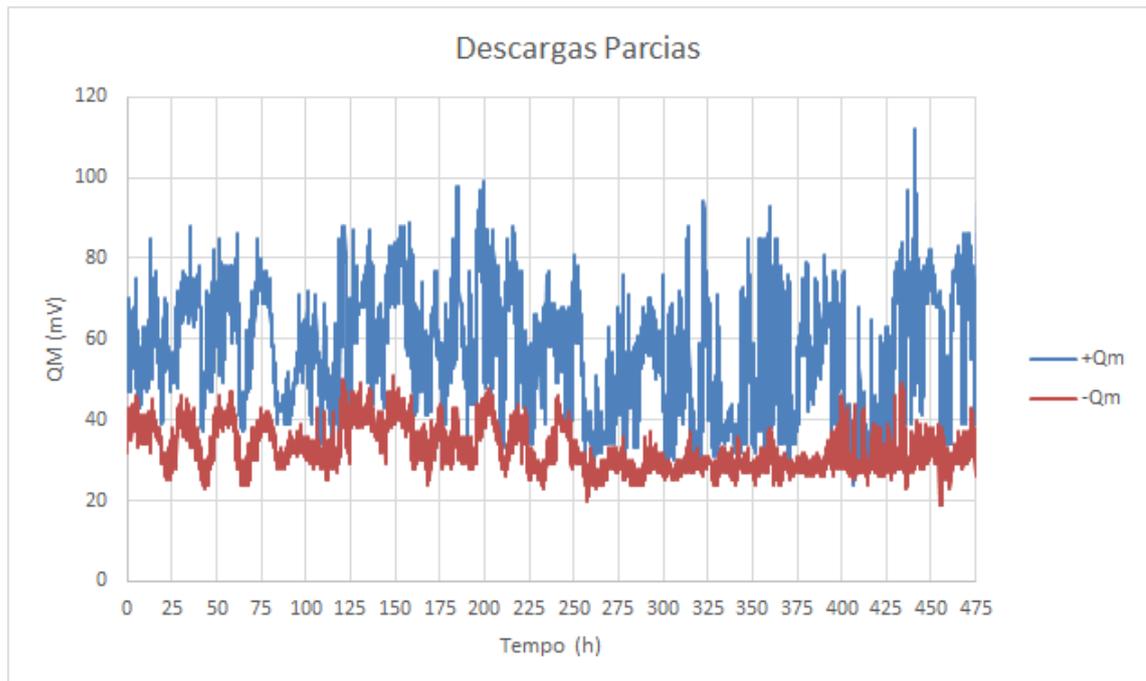


Figura 44 – Ensaio de 1000h a 1pu - Intensidade das descargas parciais divididas por semiciclos positivos e negativos

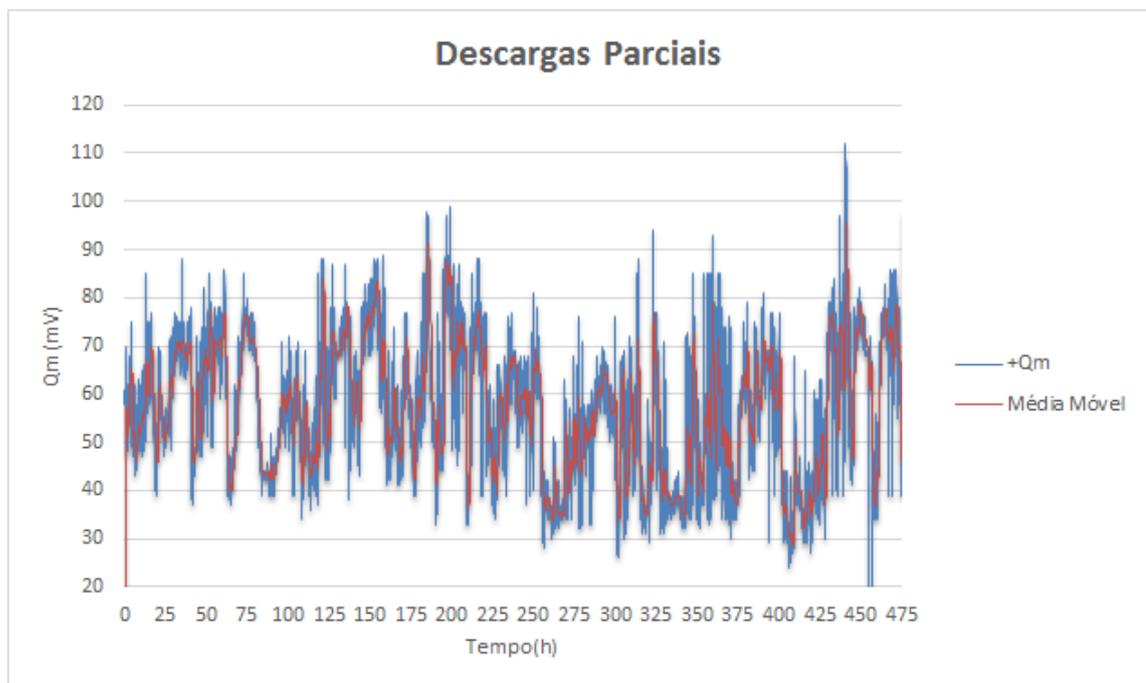


Figura 45 – Ensaio de 1000h a 1pu - Análise de tendência de +QM via média móvel com janela = 25

tensão. Desta vez não houve perda de leituras, no entanto houve um período de aproximadamente cem horas cuja alimentação foi reduzida para 1,3 vezes a tensão nominal, identificada na fonte de tensão pela equipe do laboratório, conforme é possível observar a diminuição da intensidade das descargas entre as marcas de 800 e 1000 horas de ensaio na figura 47.

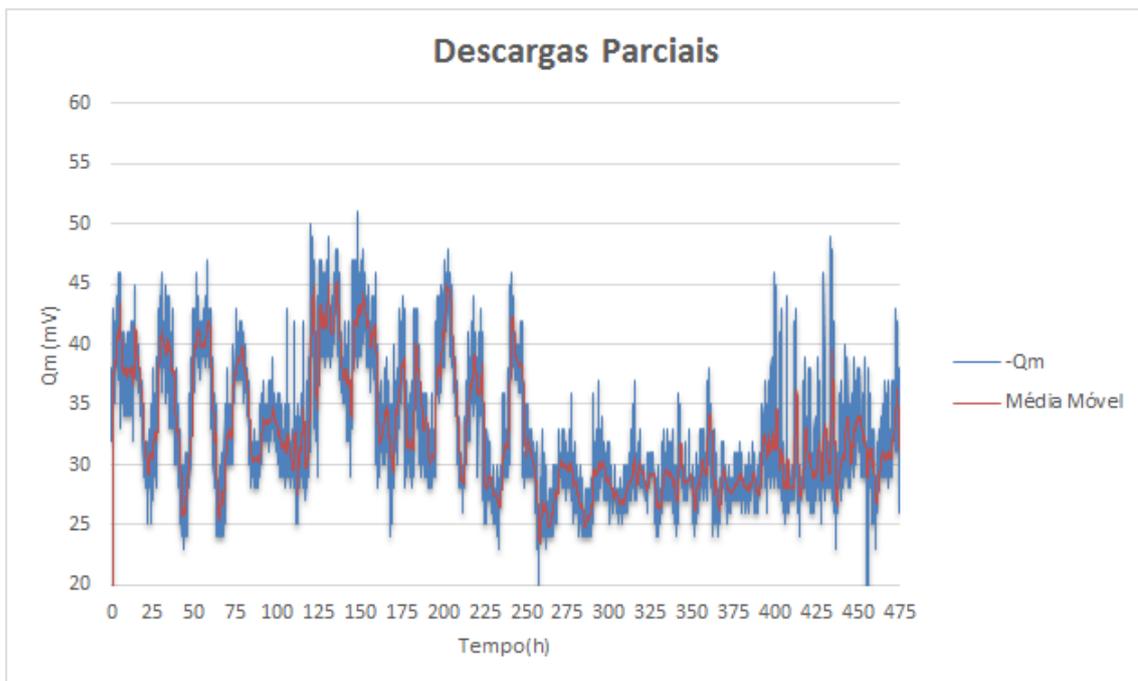


Figura 46 – Ensaio de 1000h a 1pu - Análise de tendência de $-Q_M$ via média móvel com janela = 25

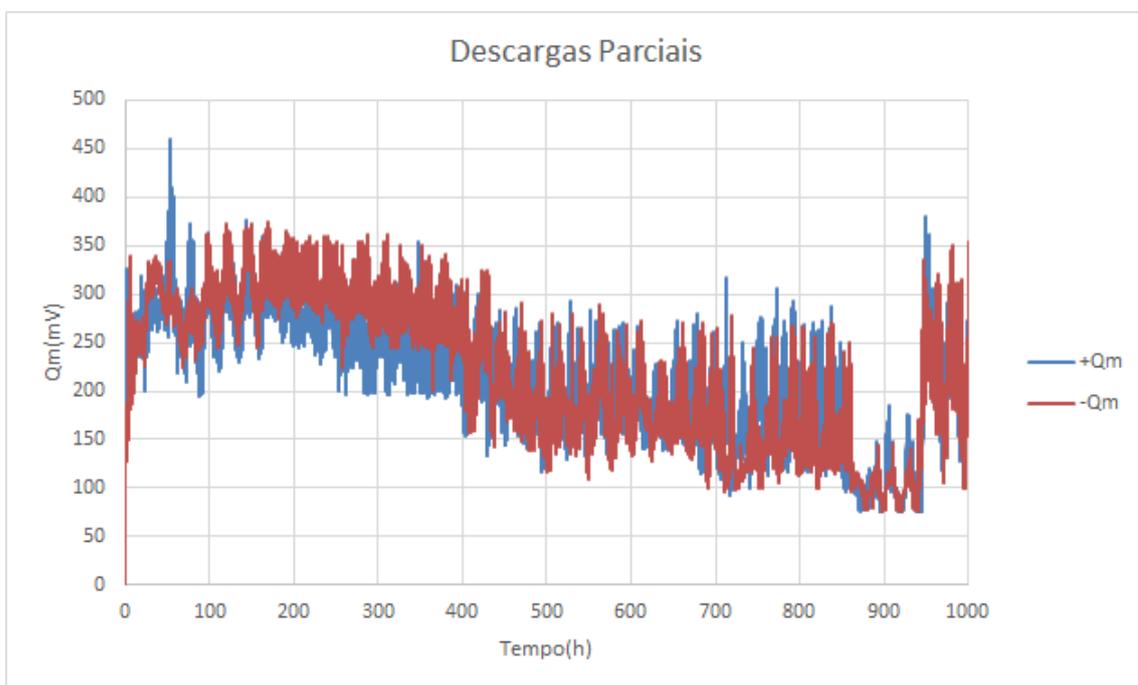


Figura 47 – Ensaio de 1000h a 2pu - Intensidade das descargas parciais divididas por semiciclos positivos e negativos

Novamente foi aplicada a técnica de média móvel com janela igual a 25 a ambos os valores de Q_m , para verificar a existência de alguma tendência na variação das descargas parciais em função do tempo neste ensaio, cujos resultados são ilustrados nas figuras 48 e 49.

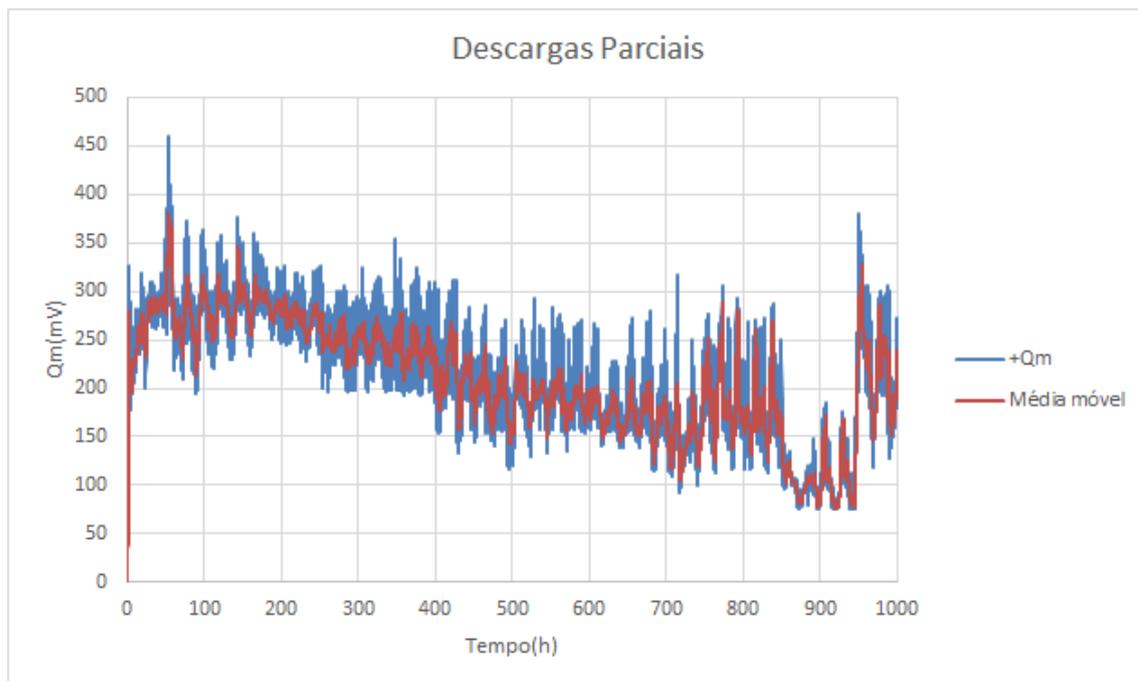


Figura 48 – Ensaio de 1000h a 2pu - Análise de tendência de +QM via média móvel com janela = 25

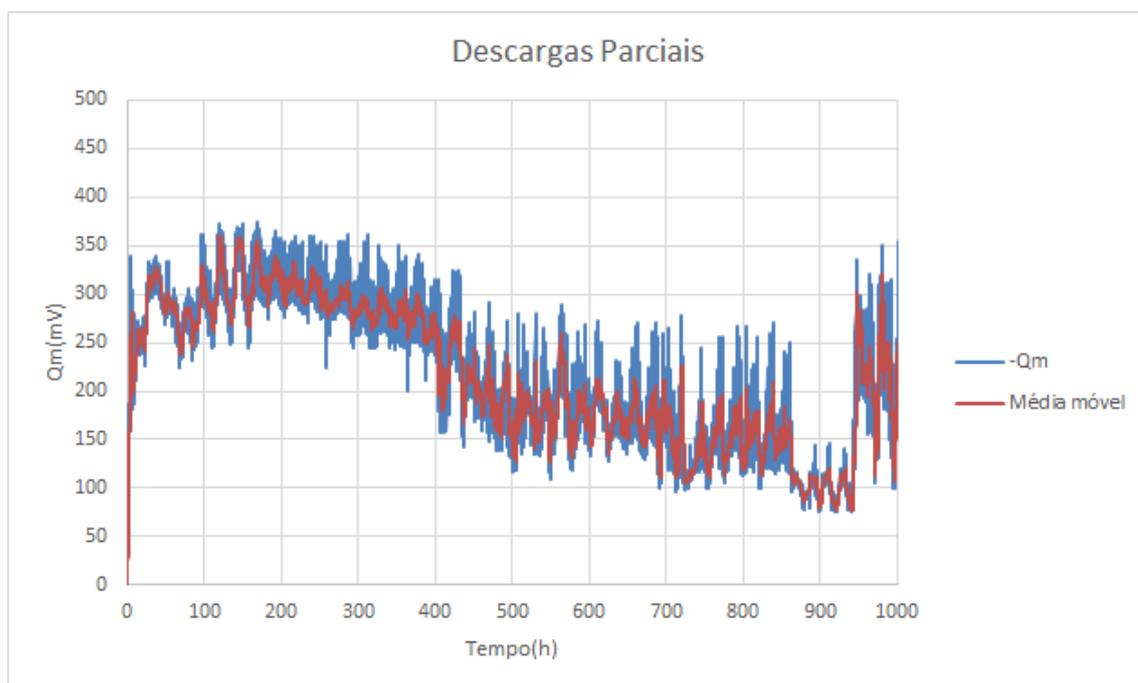


Figura 49 – Ensaio de 1000h a 2pu - Análise de tendência de -QM via média móvel com janela = 25

É possível observar que o aumento da tensão de alimentação resultou num aumento relevante na intensidade das descargas parciais em ambos os semiciclos, sendo o aumento da intensidade no semiciclo negativo ainda mais acentuado, uma vez que no ensaio de 1000 horas a 1pu seus valores eram aproximadamente 40% menores que no semiciclo positivo, enquanto no ensaio a 2pu os valores da intensidade são bastante parelhos.

A análise via média móvel indica em ambos os semiciclos uma tendência de queda da intensidade da descarga ao longo do tempo, no entanto, há uma quebra da tendência causada pela variação da tensão de alimentação. Esta quebra da tendência foi o ponto de identificação da necessidade do monitoramento da tensão aplicada, que foi realizada a partir dos próximos ensaios. Observa-se também que no momento que a tensão de alimentação é reestabelecida, a intensidade das descargas parciais sobe até um patamar ligeiramente maior que nos instantes antes da variação, e aparenta apresentar novamente a tendência de queda, porém o ensaio termina antes de ser possível confirmar tal tendência.

Depois de realizados os dois ensaios de mil horas sob tensão aplicada foi realizado o envio do medidor de descargas parciais para a Usina de Emborcação, e a aquisição e instalação do novo medidor. É importante notar que no modelo da Haefely não há separação de semiciclos, e as leituras das medições da intensidade das descargas parciais são dadas em nano Coulombs (nC). A partir de então iniciaram-se os ensaios de ciclos térmicos.

5.2 Ensaios de de ciclos térmicos com tensão aplicada

Foram realizados dois ensaios de ciclos térmicos: o primeiro com tensão nominal da barra, e o segundo com 25% adicionais, ou seja, 10kV (1,25pu). Nestes ensaios, a tensão aplicada a barra foi monitorada através do medidor de descargas parciais, uma vez que ele é capaz de fornecer diretamente o valor aplicado, diferentemente do circuito que passa por transformações e o valor real aplicado ainda precisa ser calculado a partir das leituras.

5.2.1 Ensaio de ciclos térmicos sob tensão de 8 kV (1 pu) aplicada

Durante o primeiro ensaio, foi observado um comportamento anômalo do medidor de descargas parciais: nos momentos em que o software funcionava em segundo plano, as leituras assumiam valores totalmente fora dos padrões da operação, e ao detectar tal comportamento, fechar e abrir novamente o software, imediatamente os valores voltavam a faixa padrão. Alguns destes valores foram armazenados dentro do PI System, como é possível observar na figura 50.

Fica evidente que os valores obtidos durante o comportamento anômalo, atrapalham a leitura dos sinais pois são da ordem de $1E+12$ pC, enquanto os dados reais ficam na faixa de $1E+3$ pC. Por isso é necessária a aplicação de filtros capazes de lidar com tal comportamento.

Durante a operação, observou-se que a faixa de variação de Q_m se dava entre 0 e 50000 pC (50 nC), desta forma, atendendo à pedido da equipe do projeto de pesquisa, considerou-se como valores a serem filtrados quaisquer leituras de Q_m maiores que 100nC. Foram desenvolvidos 2 filtros: um substituindo os valores de Q_m maiores que 100 nC por

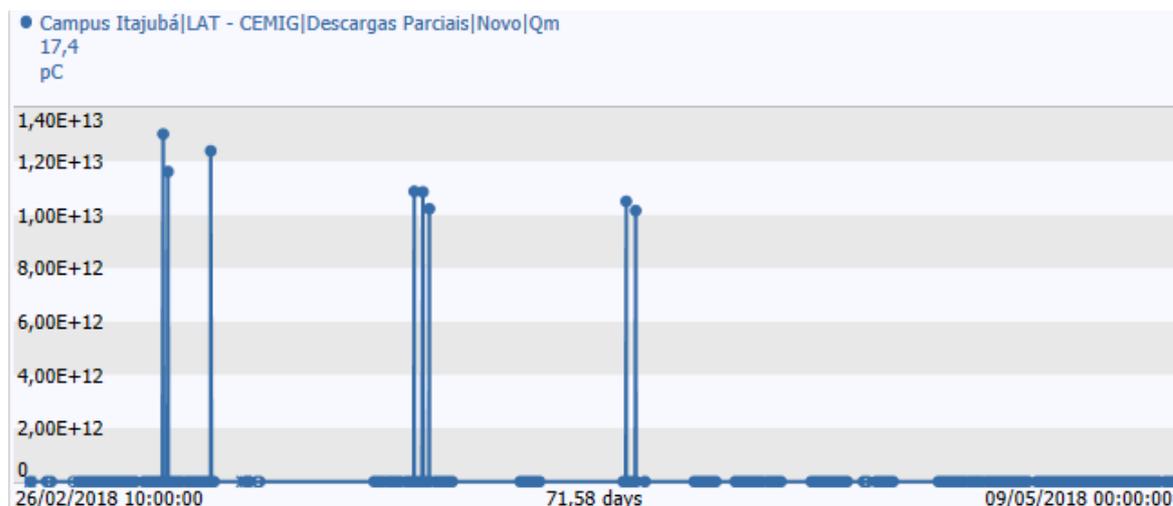


Figura 50 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras originais de Qm

“-1”, permitindo assim a rápida identificação e de descarte de valores não condizentes; e no segundo filtro, tais valores eram substituídos pela última leitura “real” registrada, desta forma as tendências eram mantidas. As figuras 51 e 52 apresentam, respectivamente os “filtros” “-1” e de valor anterior.

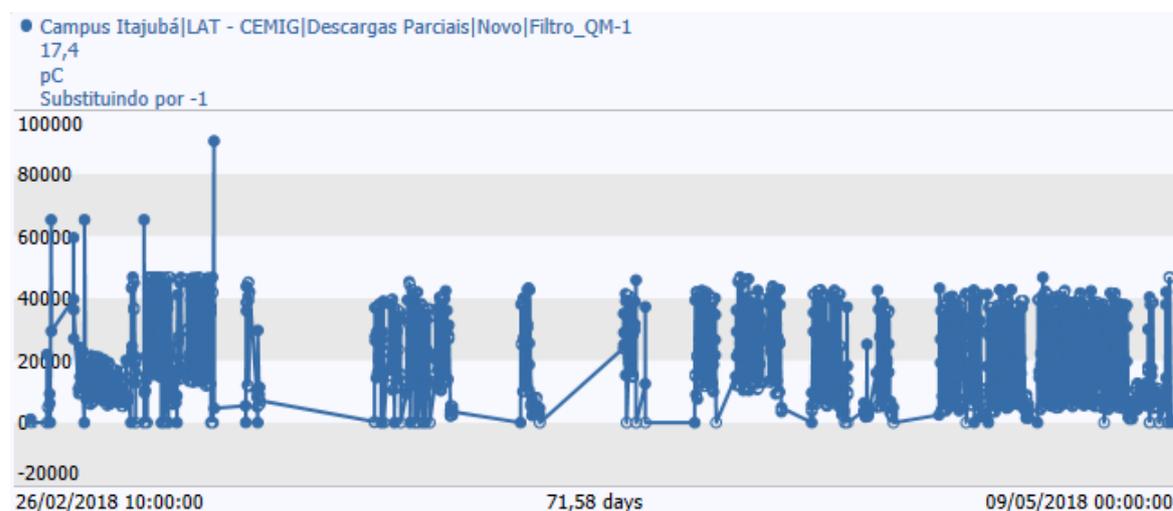


Figura 51 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de “Qm” com substituição de valores anômalos por -1

O mesmo procedimento foi empregado para as leituras de tensão, pois embora a fonte de tensão estivesse ajustada para 1 pu, ou seja, aproximadamente 7,93 kV, e apresente alguma variação conforme as variações das cargas na rede elétrica da Unifei, uma vez que a alimentação do LAT não é isolada do restante do campus, as leituras apresentavam valores na ordem de centenas de quilo volts. Os mesmos “filtros” foram aplicados, utilizando a tensão de 50kV como referência, e os dados filtrados são apresentados nas figuras 53 e 54.

Como é possível observar nas figuras 51 e 52, o ensaio precisou sofrer várias pausas,

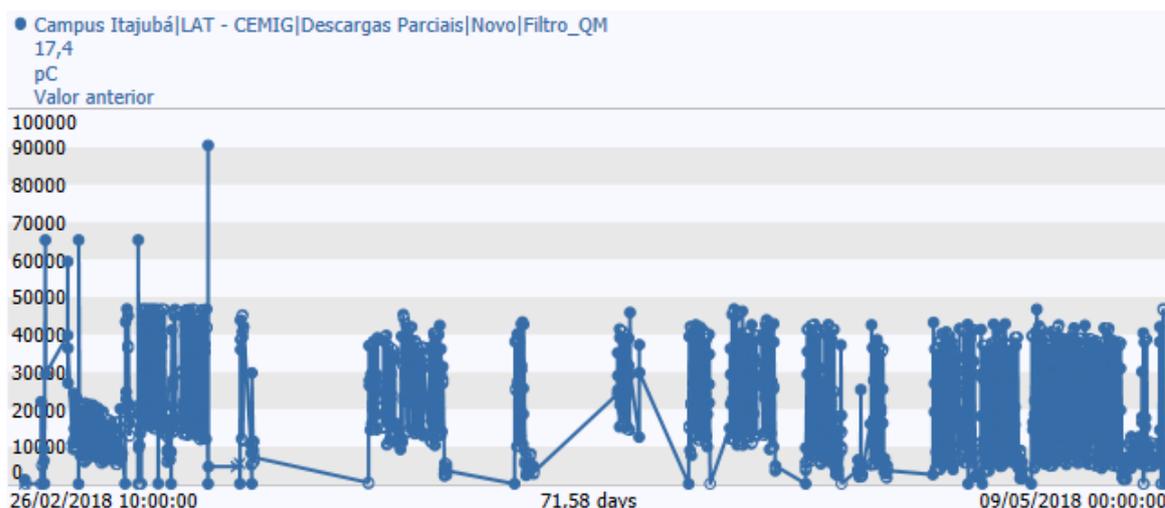


Figura 52 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de “Qm” com substituição de valores anômalos pela última leitura válida

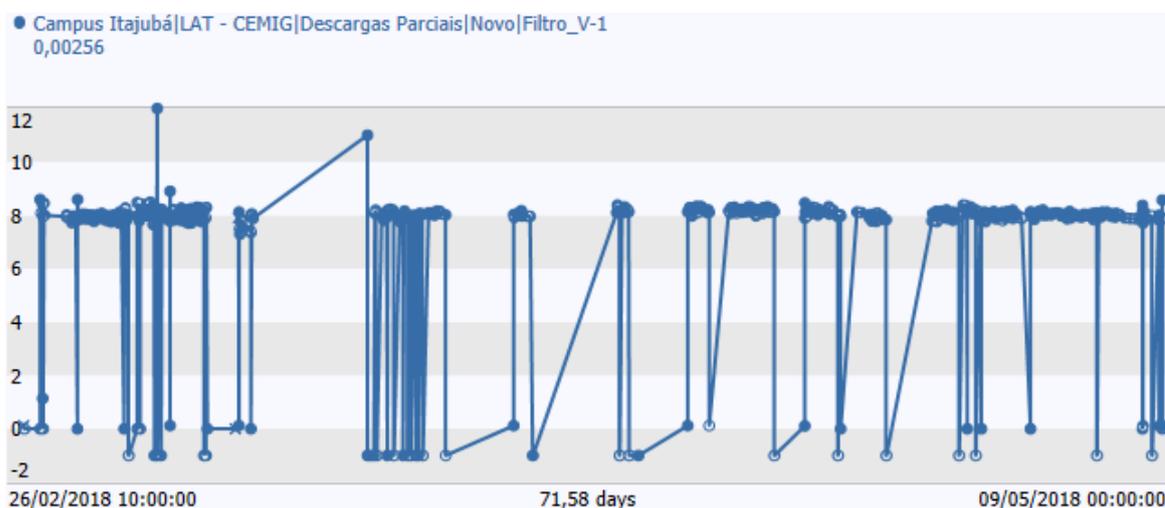


Figura 53 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de tensão com substituição de valores anômalos por -1"

por diversos fatores como, interrupções de energia ou rede no laboratório, modificações e ajustes no programa do CLP, entre outros. Contudo, mantendo-se a contagem dos ciclos térmicos realizados, essas interrupções não influenciam no resultado do ensaio, daí a importância de haver uma tag do PI registrando os ciclos realizados.

Para a análise dos dados, no entanto, é conveniente suprimir os dados coletados durante as pausas. Ao fazer isso, constata-se que o ensaio de ciclos térmicos durou quase 800h que corresponderam a 409 ciclos até o momento em que houve falha na barra. A figura 55 apresenta a variação da temperatura ao longo do ensaio, e a figura 55 ilustra em maior detalhes a variação em um período de vinte horas.

A elevação da temperatura identificada no final do ensaio, foi intencional e causada pela variação do limite superior da temperatura para o ensaio.

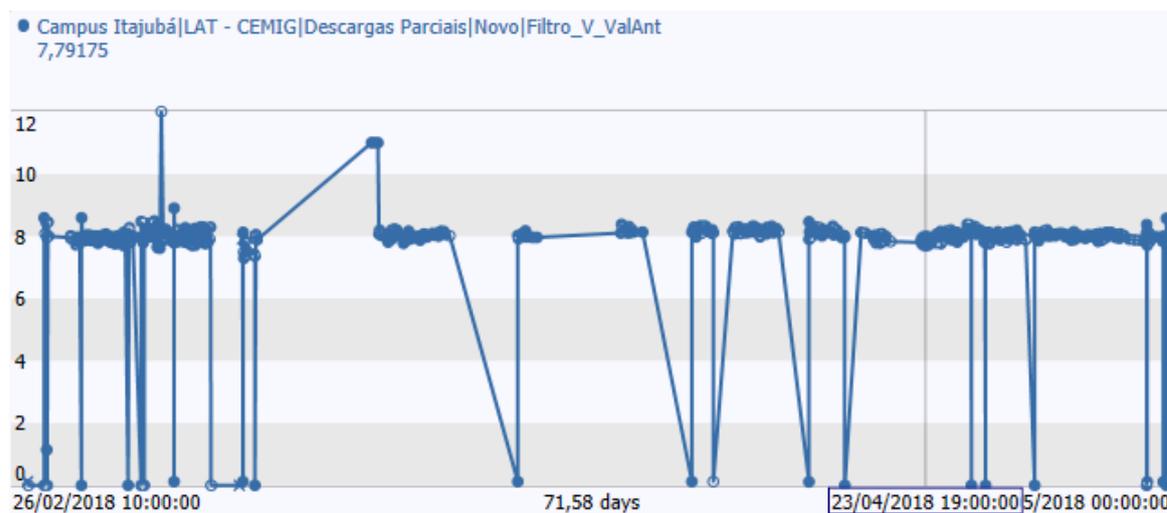


Figura 54 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Leituras de tensão com substituição de valores anômalos pela última leitura válida

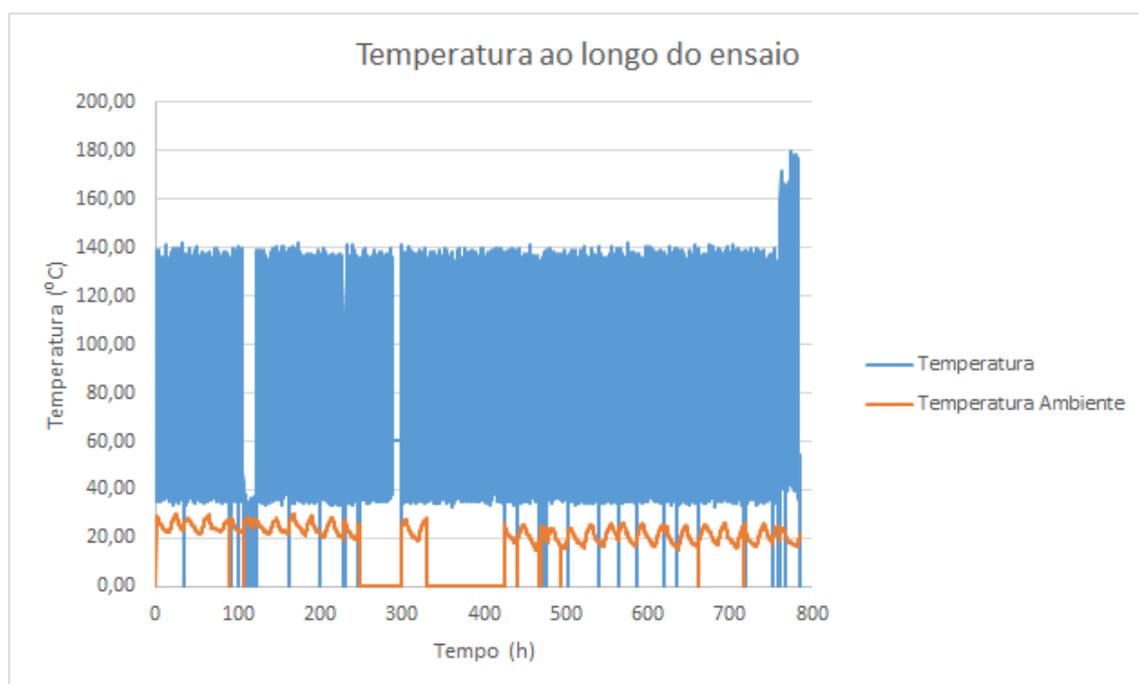


Figura 55 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperaturas ao longo do ensaio

Analisando a figura 56 é possível notar que a temperatura do ambiente não afetou o tempo dos ciclos, tal comportamento é esperado uma vez que a variação da temperatura ambiental durante o ensaio foi pequena em relação ao isolamento térmico da barra em ensaio.

O monitoramento da tensão indica que a tensão de alimentação permaneceu de, forma geral, constante ao longo do ensaio, como ilustra a figura 57, tendo apresentado valores de até 11 kV por um curto intervalo próximo a marca das cem horas de ensaio. Comparando-se as medições de tensão e de intensidade de descargas é possível identificar um período entre as marcas de 300 e 400 horas onde o medidor não realiza leituras,

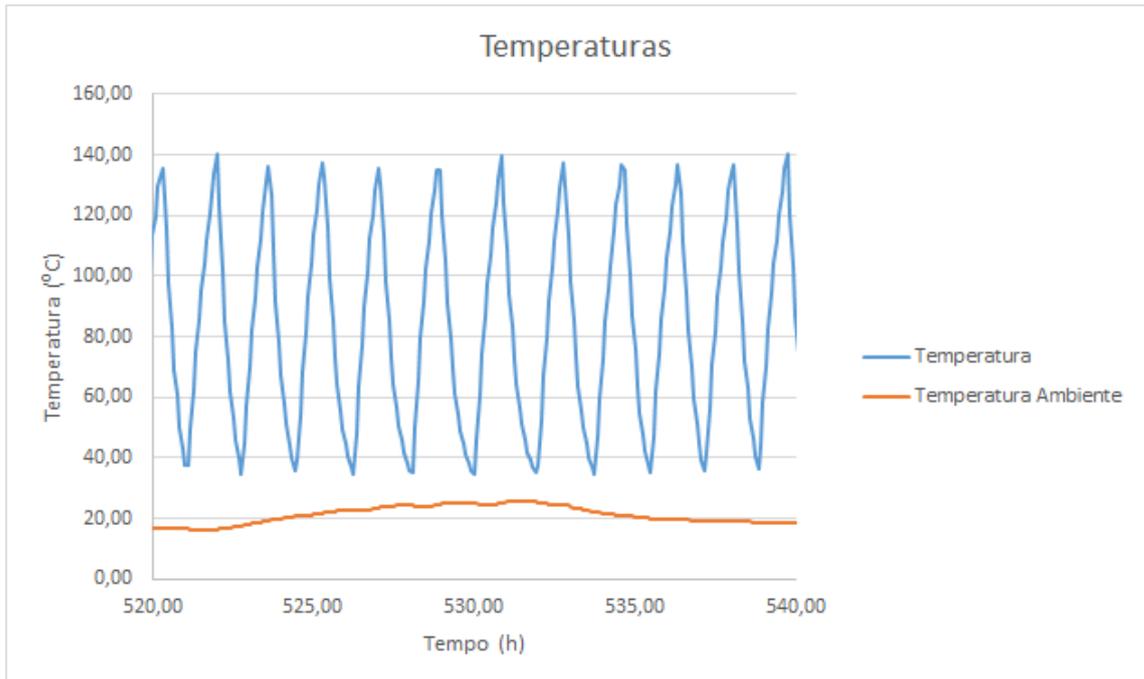


Figura 56 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Variações das temperaturas ao longo de vinte horas

assumindo neste caso valor abaixo de 1pu. Ao final do ensaio, nota-se um pico de tensão em torno dos 16 kV, causado pela falha da barra.

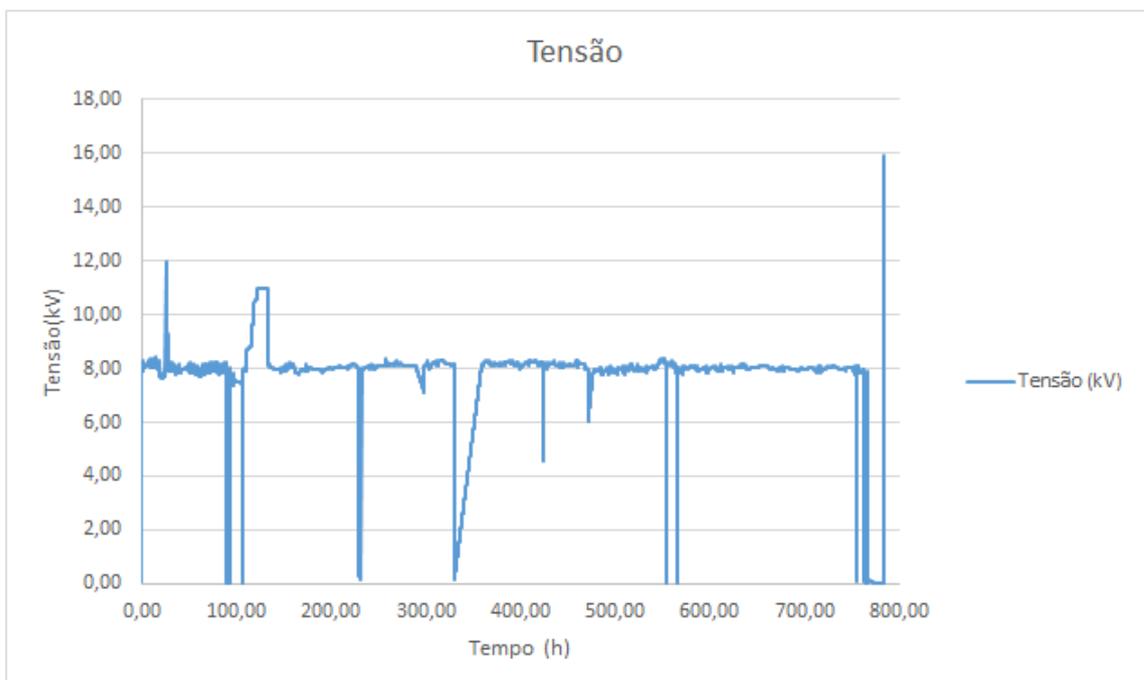


Figura 57 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Tensão de alimentação ao longo do ensaio

A análise de tendência via média móvel indica que houve uma diminuição da intensidade de descargas e é interessante notar a queda abrupta nos valores de leitura

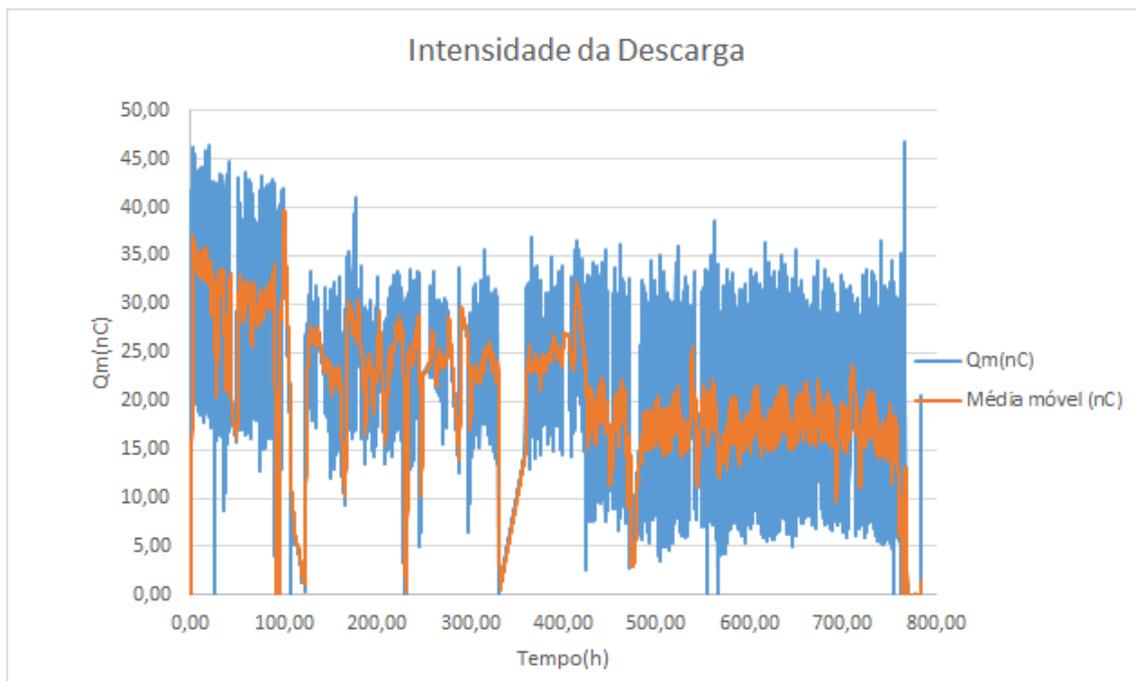


Figura 58 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Intensidade das descargas ao longo do ensaio

nos instantes que antecedem a falha. Um comparativo entre as leituras e a média móvel é apresentado na figura 58.

Devido a quantidade de dados disponíveis, um gráfico de comparação entre a temperatura e a intensidade de descargas parciais durante todo o ensaio, não permitiria boa visualização das curvas, portanto a comparação é feita usando um período de vinte horas, e é apresentada na figura 59.

Através dessa comparação há forte indício de correlação entre temperatura e intensidade das descargas, uma vez que as curvas possuem comportamento análogo em relação ao tempo, isto é, variam de forma conjunta: quando a temperatura aumenta, há aumento da intensidade, e quando a temperatura diminui, a intensidade de descargas também diminui.

Calculando-se a correlação entre as duas grandezas, obtém-se um coeficiente de correlação de 0,9068, comprovando a forte correlação dos dados. Ajustando-se os dados por ordem crescente de temperatura, é possível plotar o gráfico da intensidade de descarga em função da temperatura e a correlação entre as variáveis fica bem evidente. O gráfico é apresentado na figura 60.

A partir dessa análise foi realizada a regressão linear simples dos dados para obtenção de um modelo a ser comparado com as leituras dos ensaios subsequentes servindo como ferramenta na identificação de comportamentos anômalos das descargas parciais. O valor de R^2 obtido foi de 0,8223, indicando que o modelo é aceitável. Assim o modelo foi incorporado a uma análise do PI que lê o valor da temperatura e calcula o valor esperado

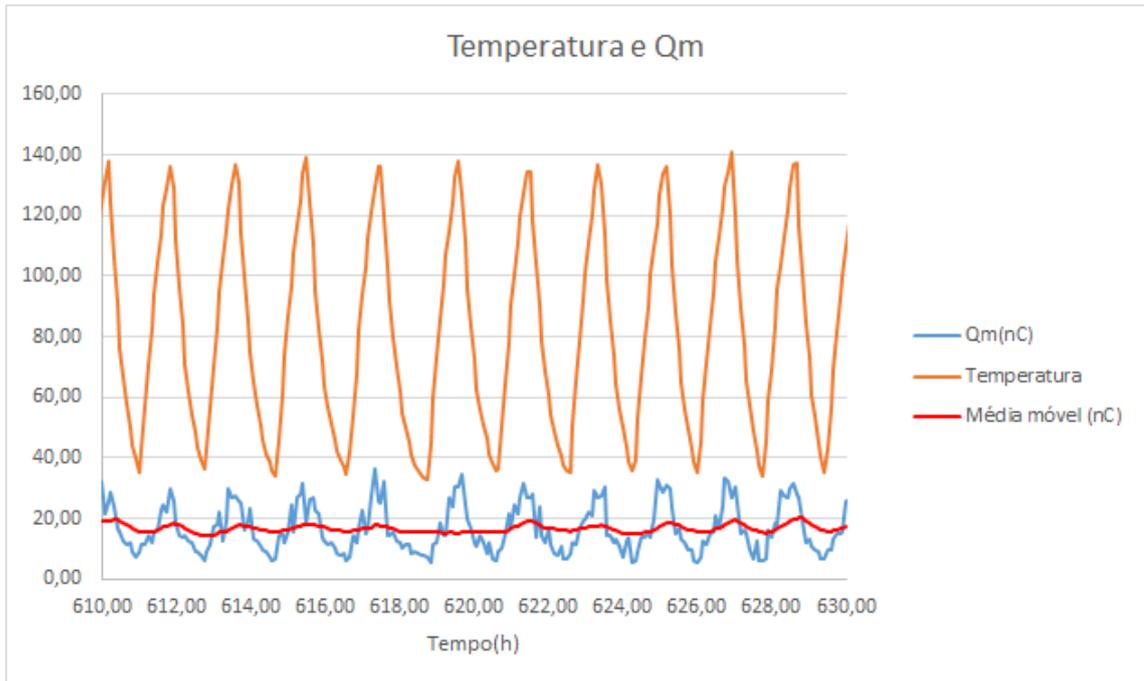


Figura 59 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperatura e intensidade de descargas ao longo do ensaio

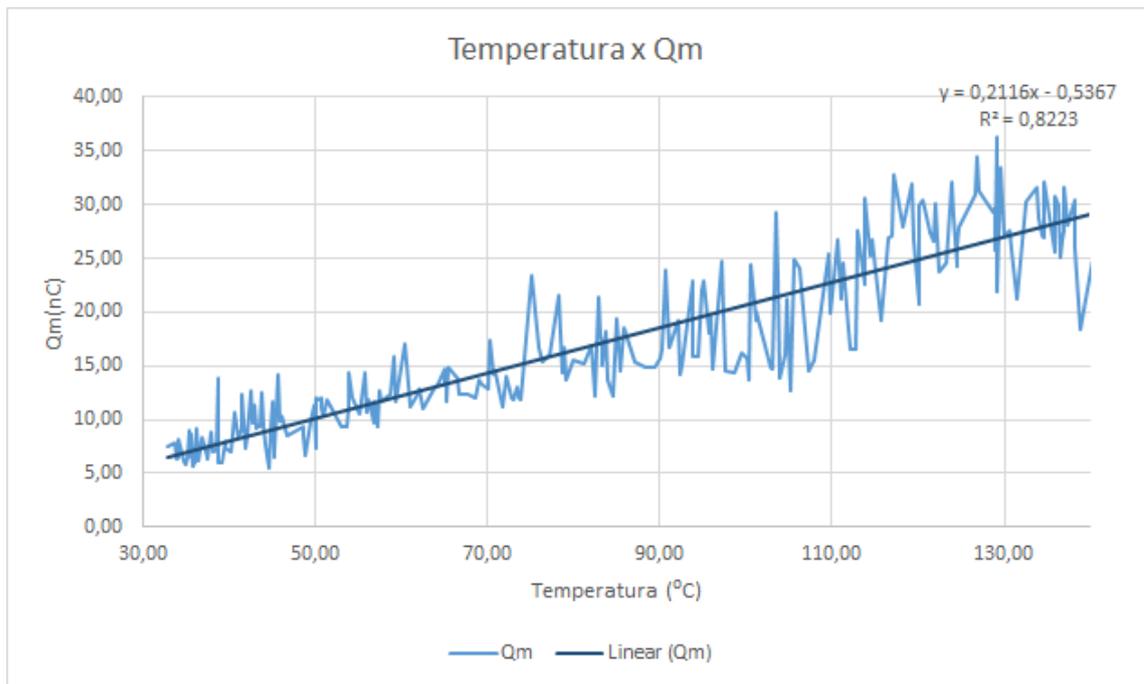


Figura 60 – Ensaio de ciclos térmicos a 1pu - Temperatura x Qm e regressão linear

para a intensidade da descarga parcial, o valor é armazenado na tag "Qm estimado" e serve como uma referência para o valor esperado para as leituras de Qm.

5.2.2 Ensaio de ciclos térmicos sob tensão de 10 kV (1,25 pu) aplicada

O segundo ensaio de ciclos térmicos foi realizado com a tensão de 10kV, equivalente a 1,25pu, conforme mencionado. Não é possível realizar o ensaio de ciclos térmicos com tensão maior que essa pois com a atuação da corrente induzida na barra, a corrente na fonte ultrapassa os 40A e a proteção da fonte atua. Neste ensaio, a barra suportou menos ciclos que a barra do primeiro ensaio, falhando após apenas 194 ciclos, em cerca de 250 horas, indicando que o envelhecimento causado pelos ciclos térmicos é bastante acelerado pela sobretensão.

Novamente, a massa de dados total da temperatura não permite uma análise profunda direta, conforme é possível observar na figura 61, exigindo, portanto uma análise em uma faixa menor de tempo. Desta forma, optou-se pela inclusão da figura 62 para apresentação dos dados referentes a um período de 20h. Nota-se que a sobretensão interferiu também na velocidade dos ciclos: no primeiro ensaio, com apenas 1pu de alimentação, foram realizados 11 ciclos térmicos completos, enquanto no ensaio com 1,25pu, nas mesmas 20 horas foram realizados 14 ciclos.

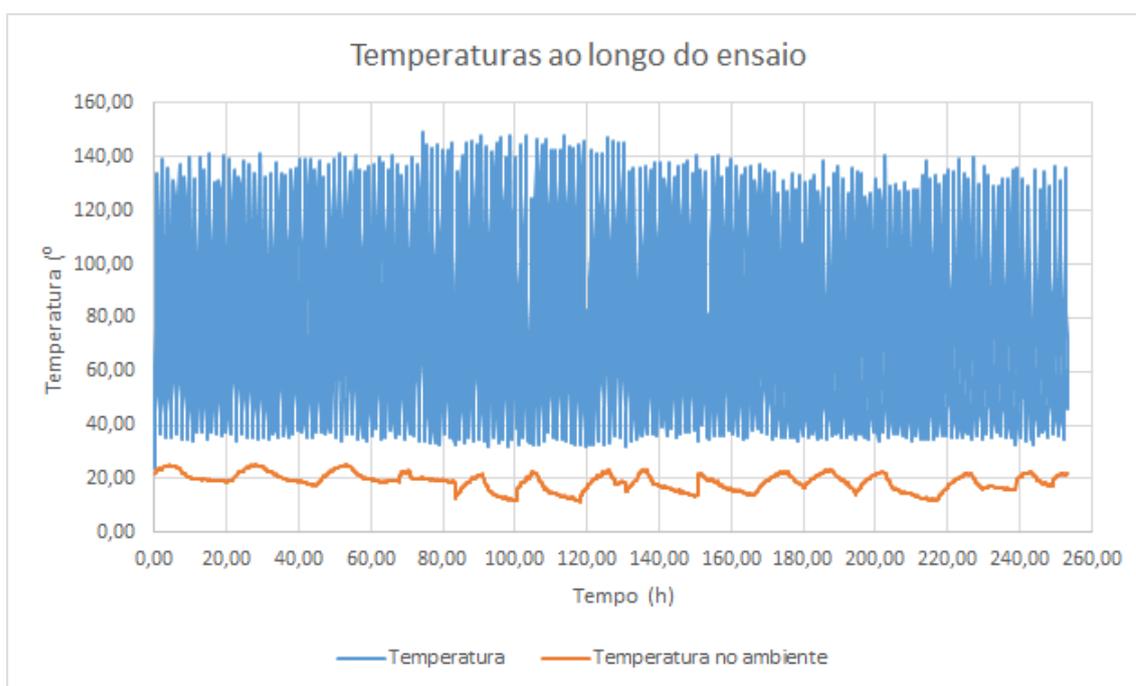


Figura 61 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Temperaturas ao longo do ensaio

Durante o ensaio, novamente a tensão permaneceu constante em torno do valor definido, tendo apenas um período de aproximadamente dez horas com falha na leitura, mantendo a alimentação em torno dos 10kV no restante do tempo. Diferentemente do ensaio com um pu, não há pico de tensão nos instantes que antecedem a falha. É interessante notar que as oscilações da tensão diminuíram consideravelmente após a marca de 180 horas de ensaio.

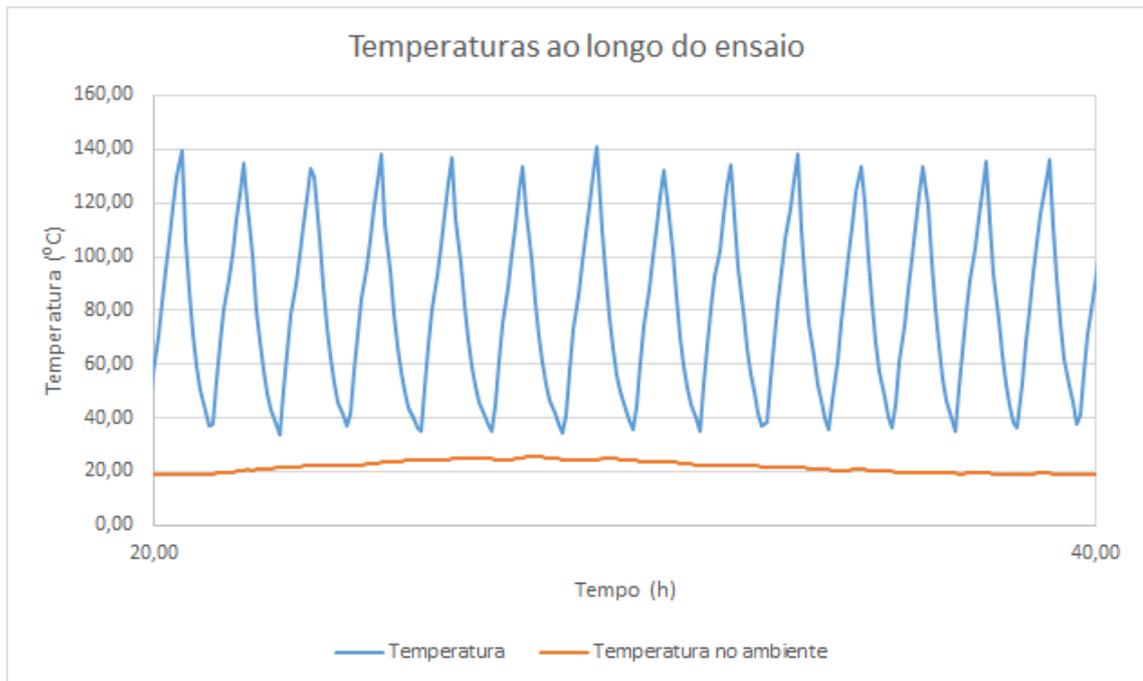


Figura 62 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Variações das temperaturas ao longo de vinte horas

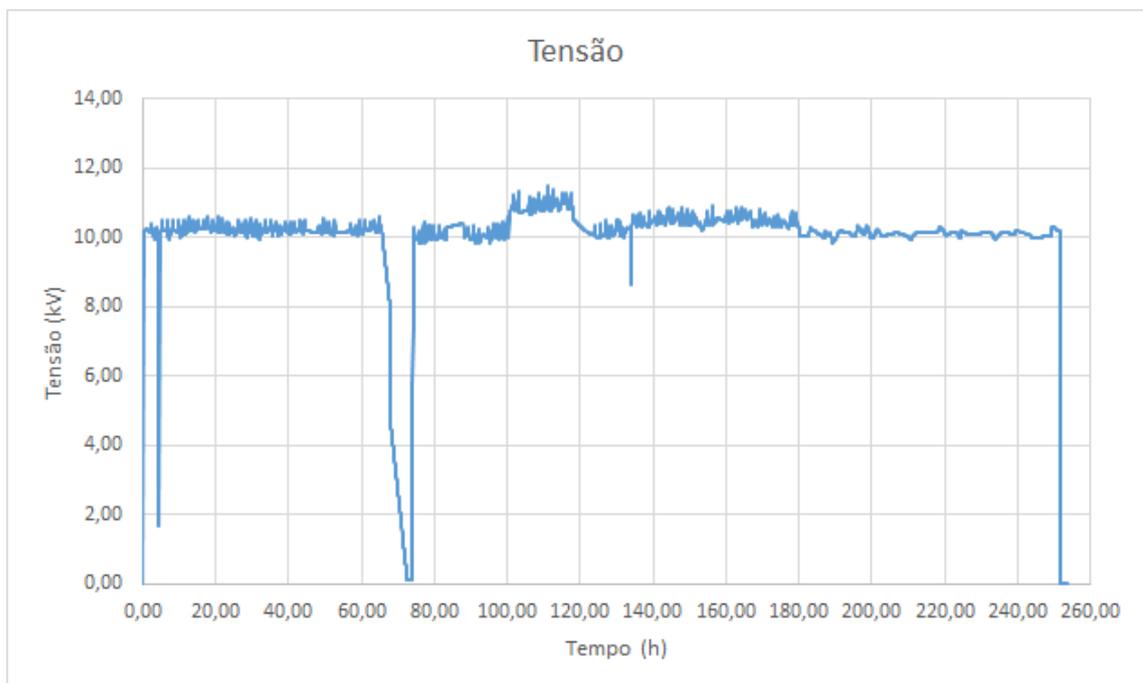


Figura 63 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Tensão de alimentação ao longo do ensaio

Nas primeiras 180 horas a intensidade das descargas parciais variou bastante mas mantendo-se num mesmo patamar, com exceção durante a falha de leitura de aproximadamente dez horas entre as marcas de 60 e 80 horas. Após a marca de 180 horas a intensidade das descargas parciais começou a aumentar, diminuindo a variação conforme a intensidade se aproximava de 35nC, conforme ilustra a figura 64, até o momento que

a barra falha com pouco mais de 250 horas, ocasionando o acionamento da proteção e interrupção da alimentação, cessando assim as descargas parciais. Essa tendência de aumento após 180 horas é mais perceptível através da análise de média móvel e foi a única tendência encontrada.

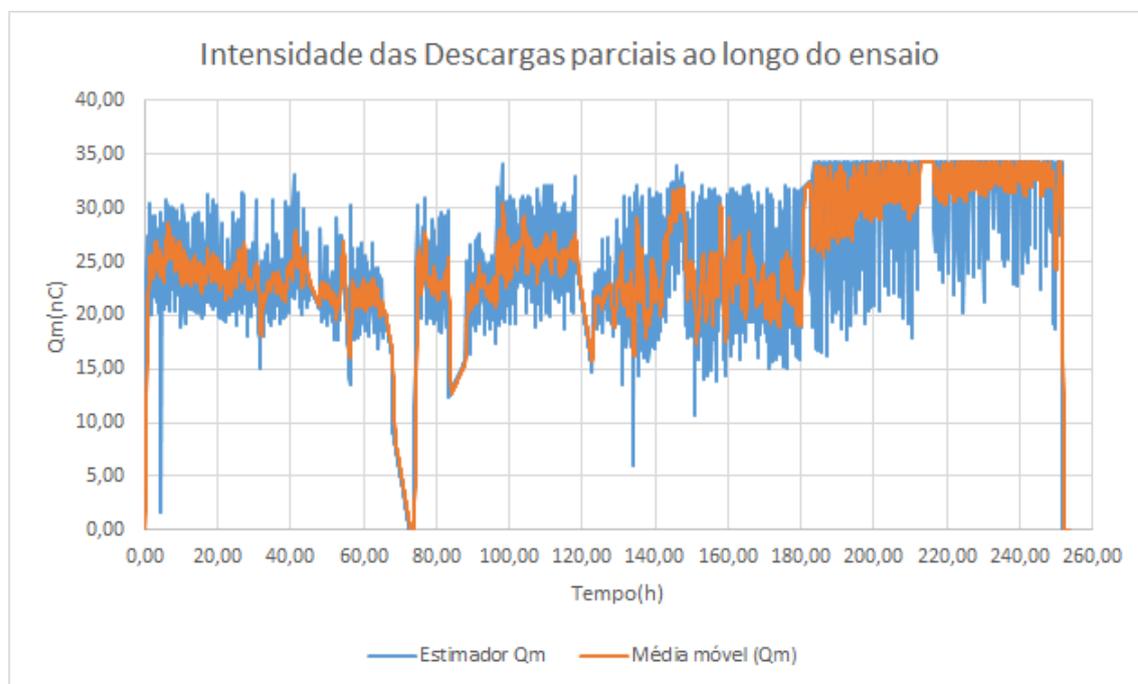


Figura 64 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Intensidade das descargas ao longo do ensaio

Assim como no ensaio com 1pu aplicado, neste ensaio também é preciso analisar um período mais curto para relacionar a intensidade das descargas parciais com a temperatura na barra. A figura 65 apresenta um gráfico para analisar tal relação. Diferentemente do que aconteceu no primeiro ensaio, no segundo as variações são mais uniformes indicando menor correlação entre as grandezas. O cálculo do coeficiente de correlação também corrobora essa análise do gráfico, resultando em um coeficiente de correlação igual a -0,15, indicando que a correlação, se existente, não é forte.

Ao analisar a estimativa feita pelo modelo de regressão em um período de 50 horas na figura 66, é possível perceber que o modelo consegue identificar valores máximos próximos aos valores máximos, porém a estimativa está adiantada em relação aos valores medidos, atingindo seus máximos picos instantes antes que a intensidade atinga os seus. Já para os valores menores, o modelo não apresenta boa estimativa, as leituras são bem maiores que os valores de vale estimados.

Essa diferença pode ser justificada principalmente pela mudança na tensão de alimentação que resulta em mudanças significativas no comportamento do ensaio.

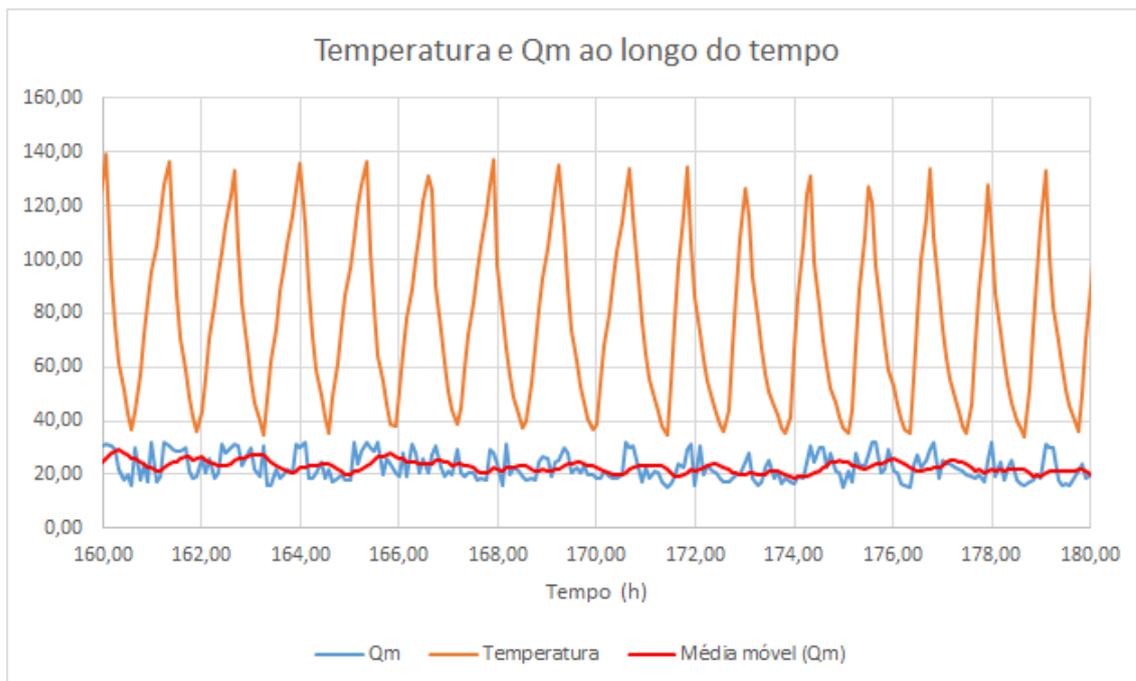


Figura 65 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Temperatura e intensidade de descargas ao longo do ensaio

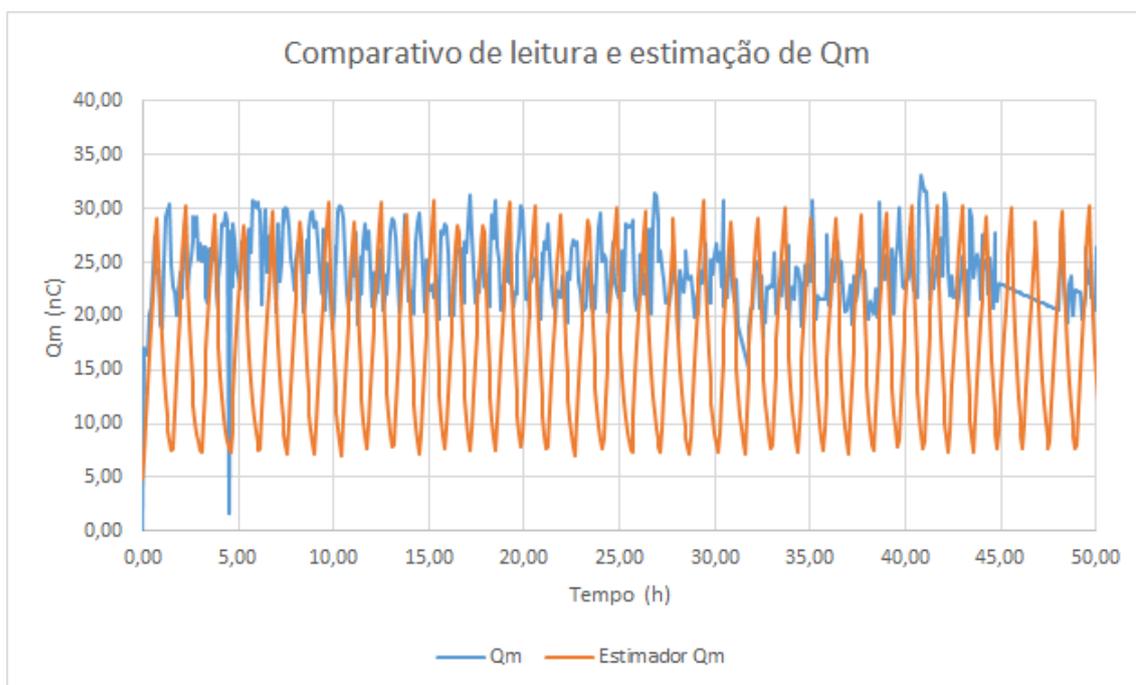


Figura 66 – Ensaio de ciclos térmicos a 1,25pu - Qm medido e Qm estimado ao longo do ensaio

5.2.3 Análise dos eventos de ciclos

Com a utilização do PI Event Frames para monitorar os ciclos de aquecimento e resfriamento, é possível facilmente obter informações das variáveis durante os intervalos de tempo determinados pelos ciclos, e assim se pode comparar os ciclos entre si. Tanto para

os ciclos de aquecimento quanto de resfriamento são monitorados: a duração em minutos do processo, a intensidade média das descargas parciais em nano Coulombs durante o período, a média da corrente induzida na barra em Amperes, e também a tensão média aplicada na barra em kilovolts.

A seguir seguem análises dos ciclos do 2o ensaio:

5.2.3.1 Análise de Ciclos de Aquecimento

Foram verificados 180 eventos de referentes a ciclos de aquecimentos. É possível ver a evolução da duração de tais ciclos ao longo do ensaio na figura 67. Observa-se que a duração permaneceu dentro do intervalo entre 40 e 50 minutos por aproximadamente 125 ciclos e a partir de então, a duração foi significativamente menor.

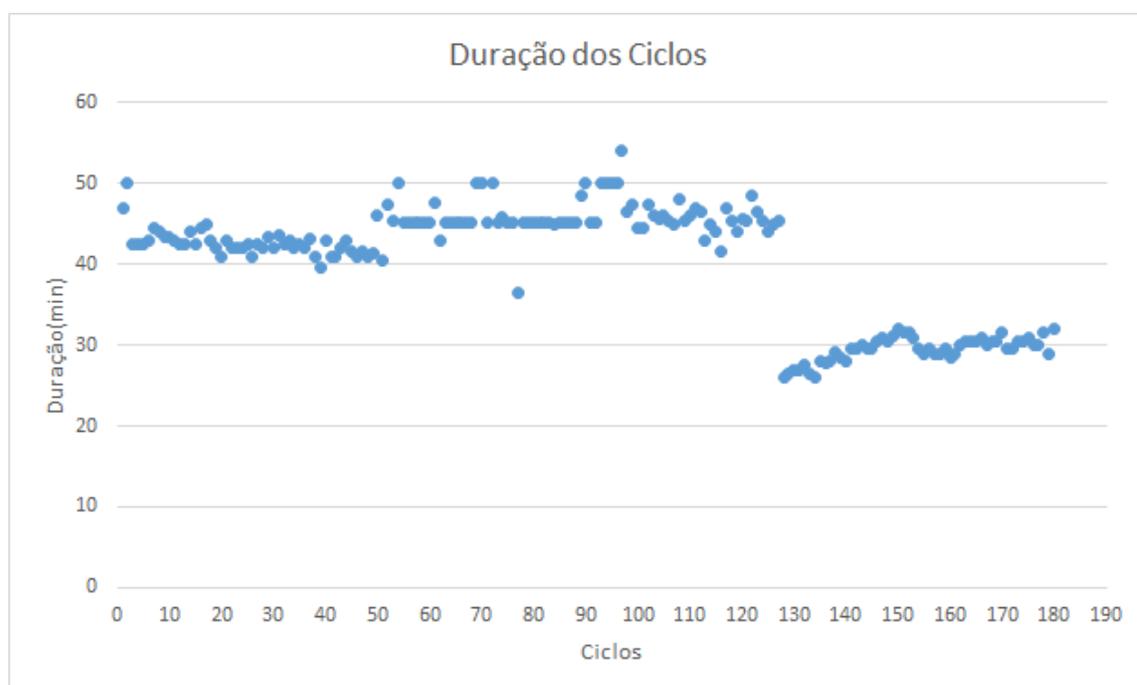


Figura 67 – Duração dos semiciclos de aquecimento de aquecimento

Na figura 68 observa-se a evolução da corrente média induzida na barra durante os ciclos. Como a corrente de indução é obtida através da utilização de conjunto de VARIAC e indutores, ela é dependente da linha de alimentação da UNIFEI, portanto apresenta comportamento de oscilação entre os ciclos. Entre os ciclos 1 e 90 a corrente se manteve num patamar próximo a 620A, apresentando apenas alguns pontos muito abaixo desses valores, durante essa faixa de ciclos.

Entre os ciclos 90 e 120 o patamar de corrente caiu para quase 600A, seguido de nova queda para algo em torno de 560A, do ciclo 121 a 160, quando voltou a subir para o patamar próximo a 600A. É interessante observar que as quedas na duração dos ciclos da corrente para o patamar de 560A ocorrem em ciclos próximos um do outro.

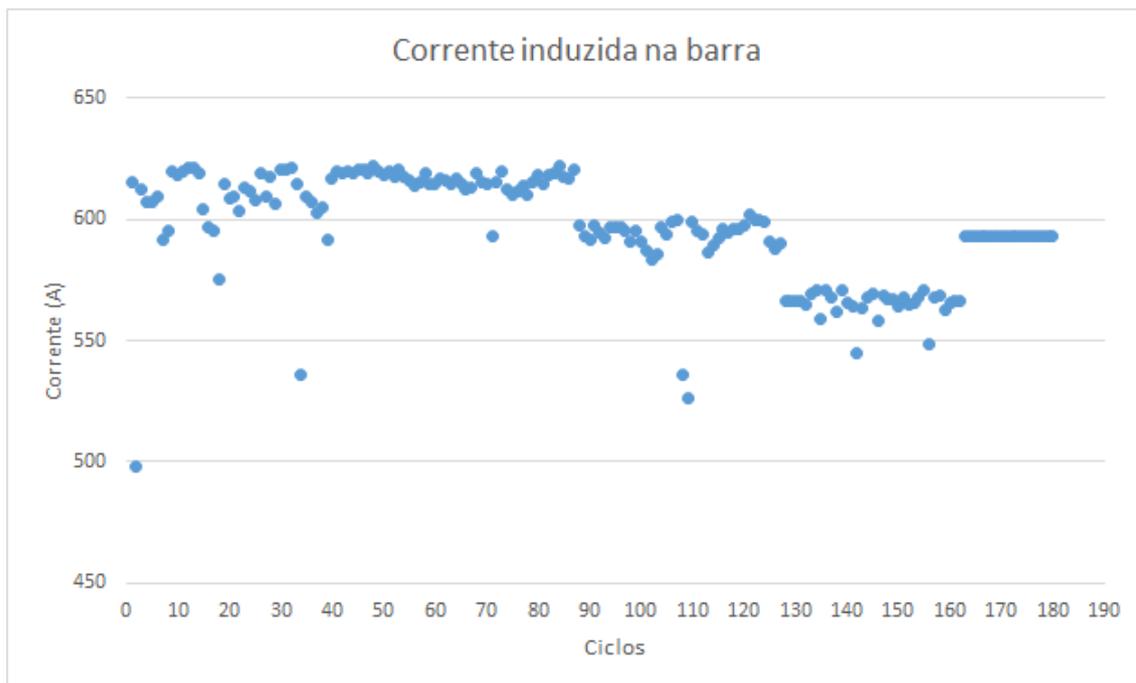


Figura 68 – Média da corrente induzida na barra em cada ciclo de aquecimento

Nas observações de tensão e intensidade das descargas parciais é possível observar que houve alguma falha nas leituras do medidor de descargas parciais (devido a variação progressiva das leituras, caso a falha fosse na fonte de alimentação, a queda seria abrupta como se observa no ciclo 180, quando ocorre a falha). Na figura 69 é possível observar ainda que a fonte de alimentação também sofre pequenas variações causadas pelas cargas na linha de alimentação da Unifei.

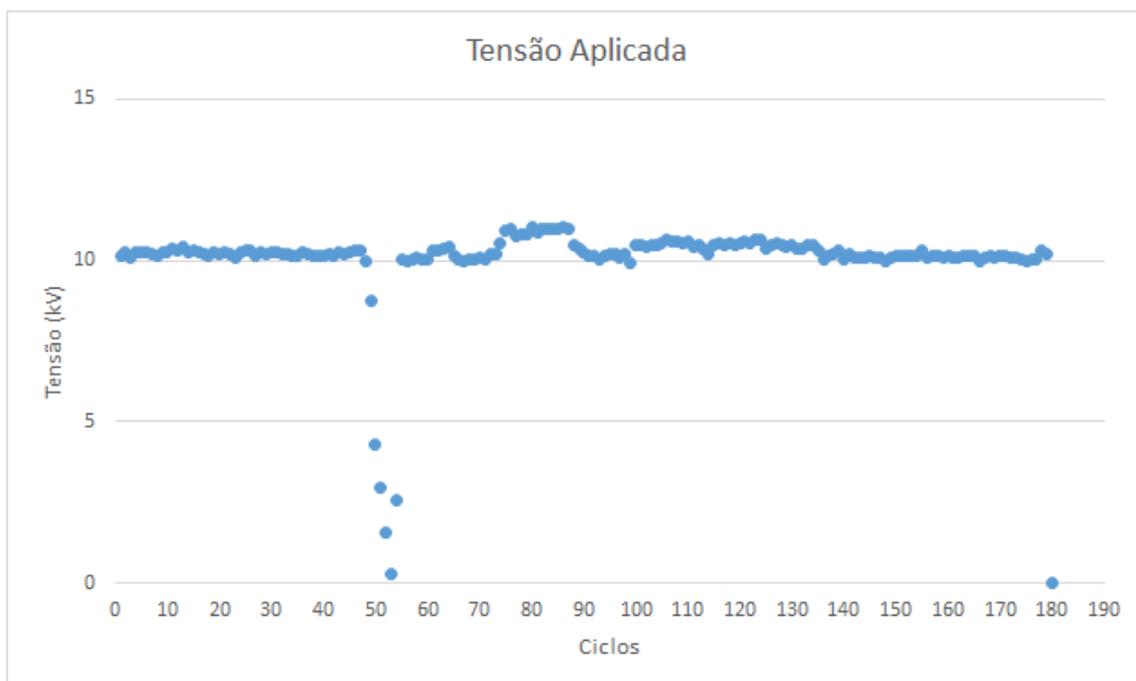


Figura 69 – Média da tensão aplicada a barra em cada ciclo de aquecimento

A figura 70 apresenta a intensidade das descargas parciais nos ciclos de aquecimento registrados, e apesar da falha já mencionada por volta do ciclo 50 e de pequenas oscilações, a intensidade mantinha-se no patamar entre 20 e 25nC até o ciclo 140 aproximadamente, quando ocorreu um degrau de subida para o patamar entre 30 e 35nC e com tendência de subida lenta porém constante, até o momento da falha, quando cai a zero.

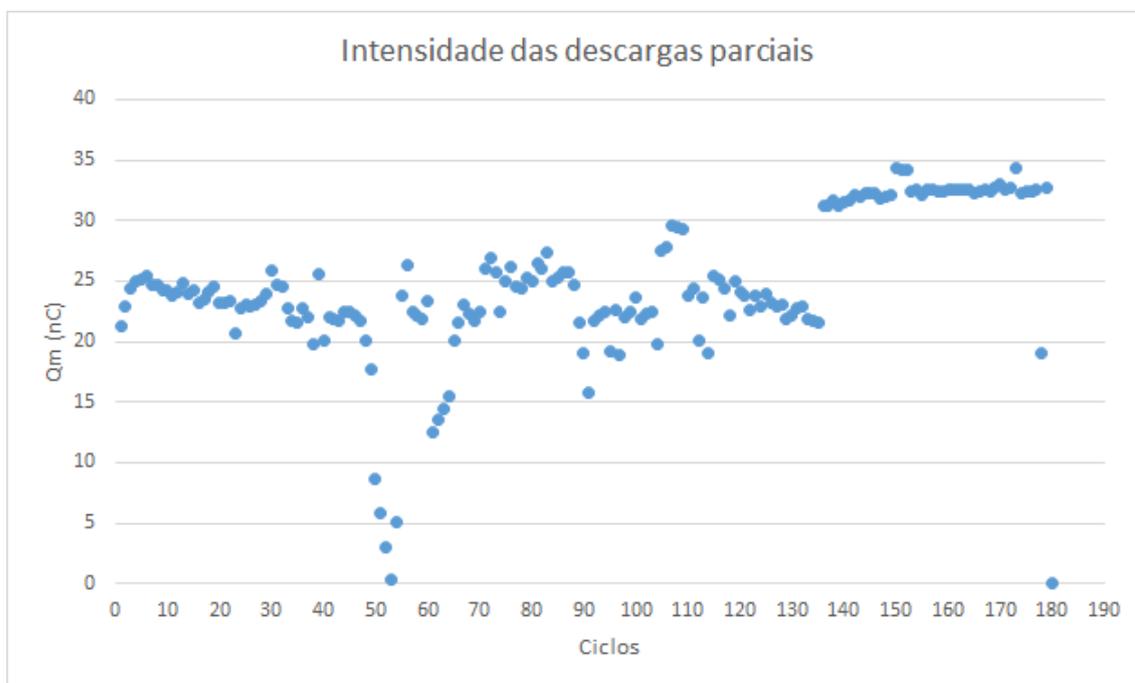


Figura 70 – Média da intensidade das descargas parciais em cada ciclo de aquecimento

Não foram observadas tendências evolutivas no comportamento das variáveis durante a evolução dos ciclos de aquecimento, no entanto, observou-se mudança no comportamento com a proximidade da falha, indo ao encontro da literatura revisada que afirma que uma mudança do comportamento durante os testes de diagnóstico pode indicar maior possibilidade de falha.

5.2.3.2 Análise de Ciclos de Resfriamento

Já para os ciclos de resfriamento, foram observados 179 eventos. A figura 71 apresenta a evolução do tempo de duração dos ciclos de resfriamento ao longo do ensaio. Diferentemente da duração dos ciclos de aquecimento que foram mais constantes, variando em degraus, a duração do resfriamento oscilou bastante, no entanto se considerarmos os patamares médios da oscilação, observa-se que as variações na duração do processo de resfriamento são contrárias ao do processo de aquecimento, ou seja, quando o aquecimento ficou mais veloz, o resfriamento por sua vez ficou mais lento, e vice-versa. Tal comportamento fica bastante evidente a partir do ciclo 130 aproximadamente quando ocorre a queda abrupta dos tempos de aquecimento e aumento constante do tempo de resfriamento.

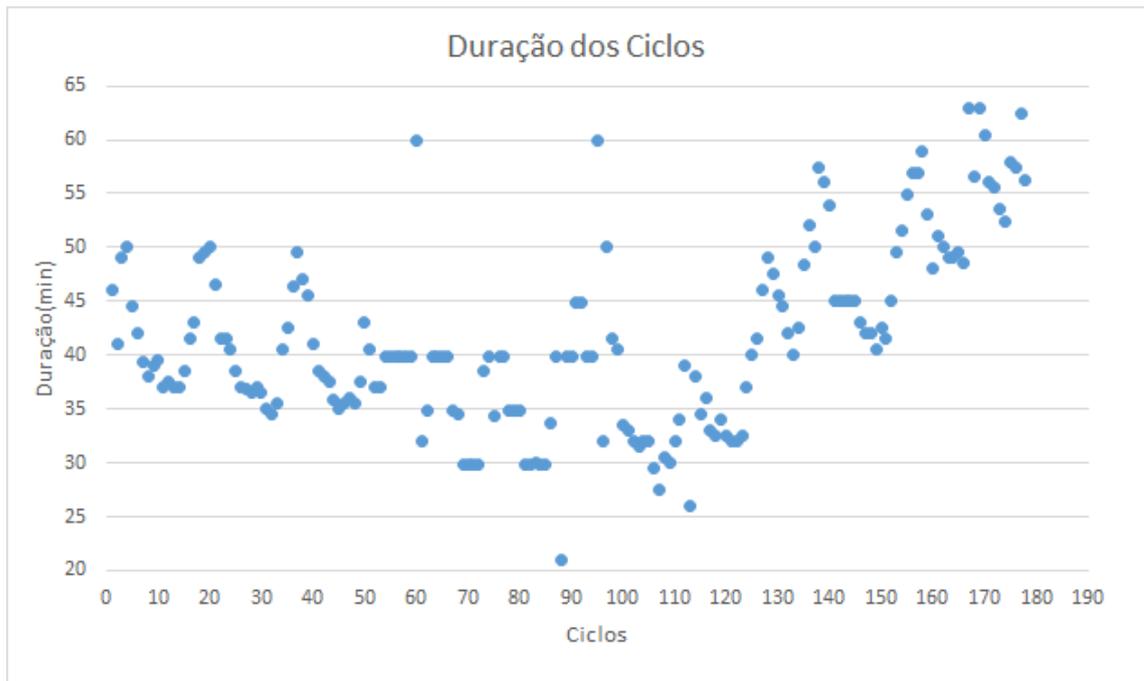


Figura 71 – Duração dos semiciclos de resfriamento

Na figura 72 há a evolução da média da corrente induzida em cada ciclo, observa-se que ela não fica em zero, mas em torno de 5A, apresentando algumas variações para valores de até quase 50A, interferindo levemente também no tempo de duração dos ciclos.

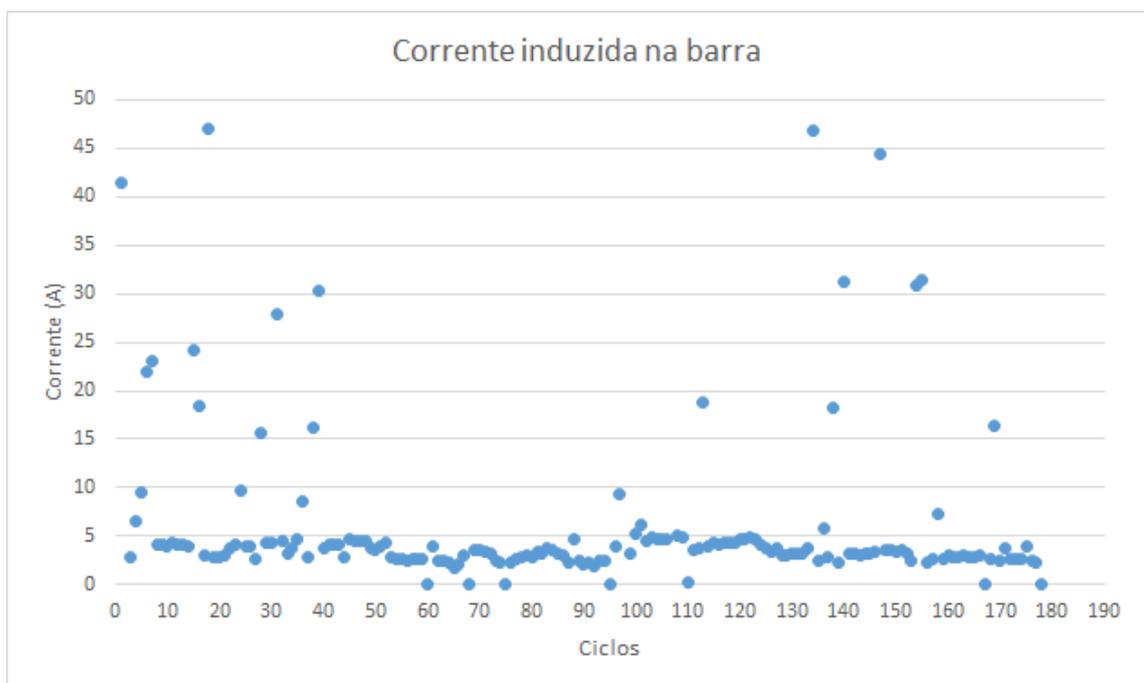


Figura 72 – Média da corrente induzida na barra em cada ciclo de resfriamento

Assim como nas análises dos ciclos positivos, é possível observar que houve alguma falha nas leituras do medidor de descargas parciais nas observações de tensão e intensidade das descargas parciais. Novamente é possível observar as pequenas variações causadas

pelas cargas na linha de alimentação da Unifei na evolução da média da tensão aplicada nos ciclos apresentada na figura 73.

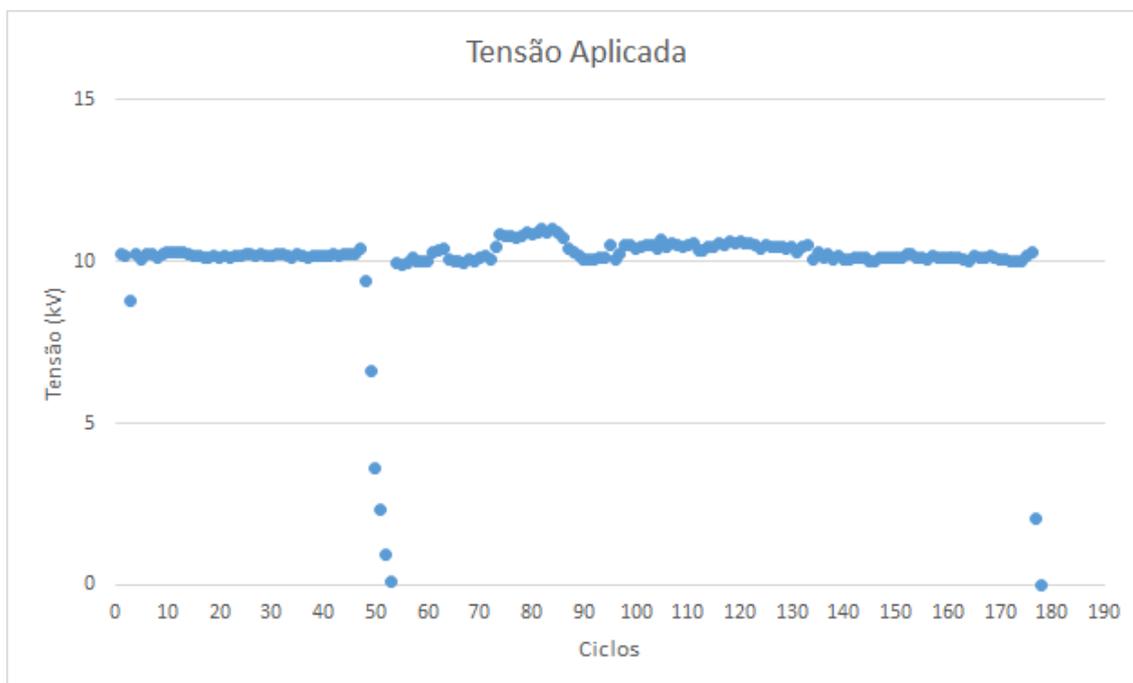


Figura 73 – Média da tensão aplicada a barra em cada ciclo de resfriamento

Na evolução da média da intensidade das descargas parciais durante os ciclos de resfriamento, apresentada na figura 74 é possível observar que a intensidade de descargas apresenta comportamento muito semelhante nos ciclos de aquecimento e resfriamento. Até o ciclo 130, aproximadamente, a intensidade apresenta variações mas mantendo-se no patamar de 25nC, e então, no referido ciclo há um salto e o patamar passa a ser entre 30 e 35nC.

Por fim, a figura 75 apresenta a comparação da intensidade das descargas parciais nos ciclos de aquecimento e resfriamento, corroborando a análise de que o comportamento da variável não difere em relação ao ciclo.

A conclusão das análises de ciclo de resfriamento é a mesma da obtida para os ciclos de aquecimento: não há ocorrência de tendência evolutiva, porém há mudança no padrão de comportamento, indo ao encontro das afirmações dos trabalhos discutidos na revisão da literatura.

5.2.4 Monitoramento online dos ensaios de ciclos térmicos

Para o acompanhamento remoto da operação durante o ensaio de ciclos térmicos foi desenvolvida uma *dashboard* através do PI Vision - ferramenta /textitweb de visualização dos dados do PI System, incluindo acessibilidade *mobile* - apresentada na figura 76. No canto esquerdo da tela, existem três gráficos de tendência de diferentes variáveis, no

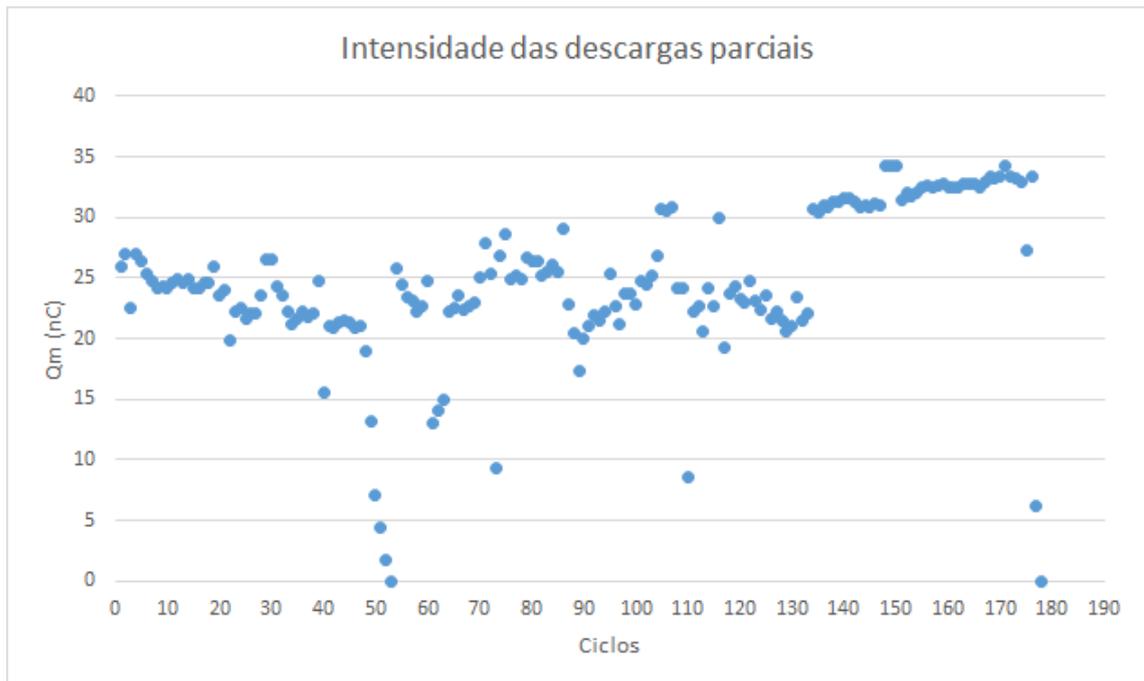


Figura 74 – Média da intensidade das descargas parciais em cada ciclo de resfriamento

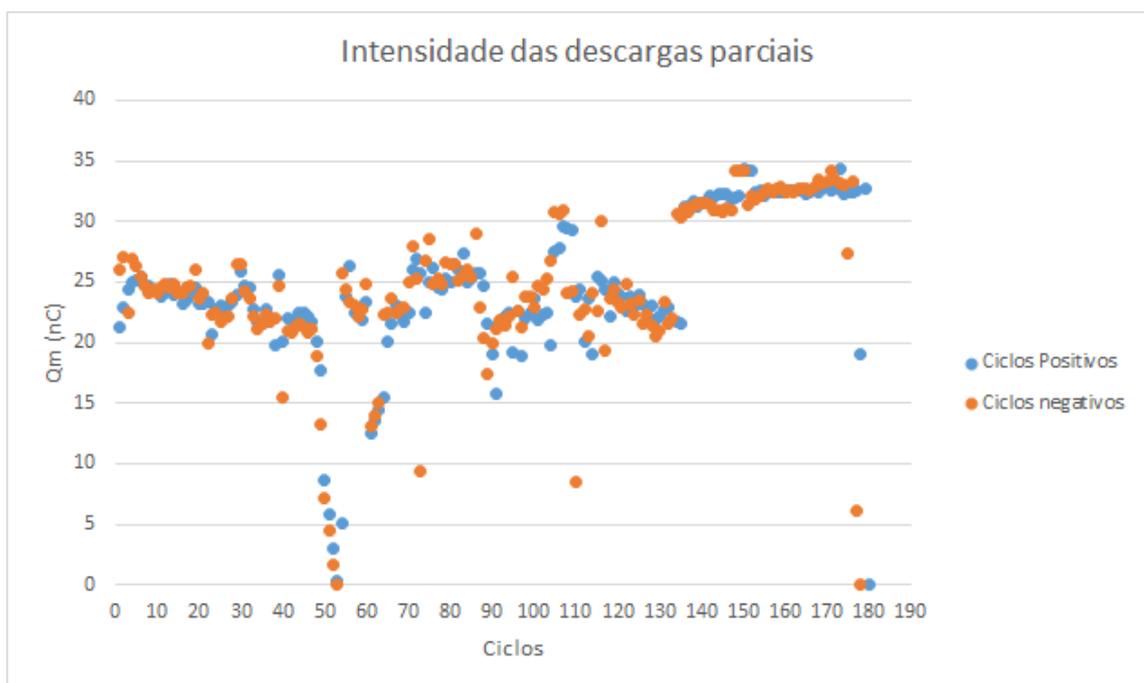


Figura 75 – Comparação das médias de intensidade das descargas parciais nos ciclos de aquecimento e resfriamento

primeiro de cima pra baixo, são comparadas a temperatura média na barra, com a temperatura do ambiente medida pelo termohigrômetro e os limites de temperatura definidos. O segundo gráfico de tendência apresenta a tensão aplicada a barra e também a corrente induzida. E o último apresenta o valor da intensidade de descargas parciais com o filtro de valor anterior, e sua média nas últimas 2 horas.

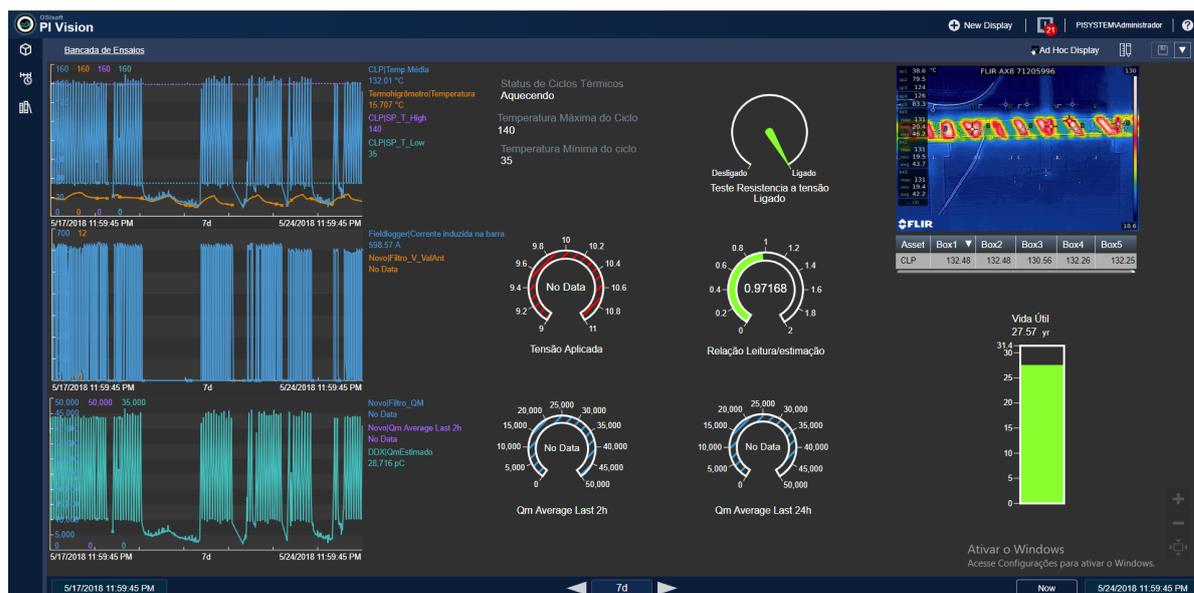


Figura 76 – Dashboard web no PI Vision para monitoramento remoto de ensaio de ciclos térmicos

No canto direito da tela, embaixo da foto da barra tirada com o Termovisor há uma tabela com os valores de temperatura registrados por cada box da câmera lidos no CLP, e também um indicador decrescente da vida útil remanescente da barra em ensaio, que é calculada a partir da relação entre a vida útil esperada de hidrogeradores - obtida por modelo estatístico (desenvolvido pela equipe do projeto de pesquisa com base em dados estatísticos de hidrogeradores utilizados em usina) - e o envelhecimento causado pelo ensaio de ciclos térmicos.

Por fim, na região central existem os indicadores de status e limites de temperatura do ensaio de ciclos térmicos, e cinco visualizadores tipo manômetro: um para indicar se a fonte do ensaio de resistência a tensão está ligada ou desligada, outro para indicar a tensão de alimentação da barra, um que indica a relação entre os valores medidos e estimados para Q_m , e os dois últimos para indicar a média das leituras de Q_m para as últimas 2 horas e também para as últimas 24 horas.

6 Conclusões e trabalhos futuros

O projeto proposto previa o desenvolvimento de automação de uma bancada localizada no LAT-EFEI que permitisse a realização de ensaios de descargas parciais e envelhecimento em estatores de hidrogeradores, com monitoramento on-line e armazenamento dos dados gerados, visando atender as demandas de projeto de pesquisa em desenvolvimento na universidade.

A automação desenvolvida permitiu a realização dos ensaios com baixa necessidade de interações dos operadores de ensaio - restritas a correções de falhas e início de operação. Com a realização dos ensaios o monitoramento online pôde ser realizado e os sistemas de segurança e notificações de estado de funcionamento funcionaram corretamente, garantindo a operação segura do sistema e informando aos responsáveis sobre eventuais falhas tão logo estas ocorressem. Além disso, grande quantidade de dados foi gerada para análise pela equipe do projeto.

As necessidades para o estabelecimento da plataforma de gerência e historiamento dos dados de ensaio foram integralmente atendidas pelo PI System, que além de realizar tais tarefas, ainda oferece ferramentas para a implementação de análises dos dados diretamente em seus bancos de dados, facilitando a integração com diferentes ferramentas de visualização. Algumas análises dos dados foram realizadas, apresentando potenciais ferramentas de análises à disposição da equipe do projeto de pesquisa.

A existência de algumas características do projeto, como: operação remota e alta conectividade dos equipamentos, geração e armazenamento de grande massa de dados, monitoramento online da operação através de diferentes ferramentas - incluindo ferramentas *mobile*, e a quantidade de ferramentas disponíveis para a visualização e análise dos dados, obtidas com a integração da bancada e seus equipamentos à um sistema PIMS robusto como o PI System disponível dentro da Universidade abre possibilidades para o desenvolvimento de novas bancadas de ensaios e experimentos remotos, permitindo a ampliação da capacidade de utilização dos laboratórios da Universidade

Contudo, é evidente que certas precauções (como por exemplo um sistema de notificações que informe aos técnicos de laboratório sobre comportamentos anômalos, de risco ou de falhas na operação) e sistemas de proteção (como disjuntores e relé-térmicos) devem ser implementadas para garantir a operação segura de tais experimentos.

6.1 Trabalhos Futuros

Em relação a bancada, ao final do desenvolvimento dos modelos de previsão de vida útil de geradores baseados nos dados obtidos pelos ensaios realizados, incorporá-los ao PI System, e à *dashboard* para o monitoramento online de tais informações, são pontos convenientes para eventual realização de novos ensaios.

Um outro foco de trabalhos futuros surgiria com a disponibilidade de mais enro-lamentos para a realização de novos ensaios, seria gerada uma massa de dados suficiente para a aplicação de técnicas de *data analytics* no tratamento de tais dados, permitindo a realização análises ainda mais complexas dos dados de ensaio e das relações entre as variáveis de estudo.

Finalmente, a realização remota de ensaios de laboratório é uma ideia que já foi discutida pelo autor dentro do ambiente da UNIFEI. Os conceitos abordados para o desenvolvimento desta bancada automatizada com possibilidade de operação e monitoramento remoto pode suscitar novos trabalhos nesta direção, como exemplo cita-se o desenvolvimento de uma plataforma *web* de interface para operação de ensaios.

Apêndices

APÊNDICE A – Programa do CLP (Ladder)

O programa Ladder desenvolvido para o controle do ensaio é apresentado nesta seção. Ele foi desenvolvido no software Siemens TIA Portal V14, com a utilização de data blocks para acondicionamento das variáveis, desta forma, em caso de necessidade de troca da CPU por outro modelo, o trabalho de realocação das variáveis na memória é mínimo, limitando-se apenas as variáveis de entrada e saída e aos registros de sistema utilizados (First_Scan). As configurações de rede do CLP são realizadas antes do desenvolvimento do código.

Para facilidade de programação e entendimento, o programa foi dividido em cinco networks ladder de acordo com a sua funcionalidade.

A.1 Variáveis, constantes e Datablocks utilizados

As variáveis utilizadas no programa foram definidas utilizando os datablocks, desta forma a alocação da memória para as variáveis é feita de forma automática e no caso de modificação do CLP basta a replicação dos datablocks sem a necessidade de adequação de cada variável. Os datablocks utilizados são apresentados na figura 77.

É importante notar que os datablocks de sistema (sob "Program Resources") contém as configurações e parâmetros de funcionamento de determinados blocos de programa, são inseridos automaticamente no momento em que um destes blocos correspondente é utilizado no programa e não tem seus parâmetros alterados no desenvolvimento do código ladder.

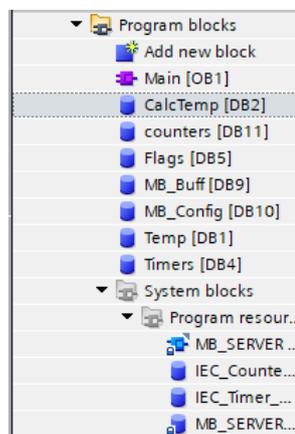


Figura 77 – Datablocks utilizados

O datablock "calctemp" armazena os resultados dos cálculos de média e soma total das temperaturas, o "Temp" armazena as temperaturas convertidas para graus Celsius após o recebimento via Modbus (onde são enviadas na escala Kelvin). Os datablocks "Counters" e "Timers" armazenam os valores de contagem e temporização dos blocos contadores e temporizadores usados no programa. O datablock "Flags" contém todas as flags criadas para o desenvolvimento do código. Finalmente os datablocks "MB_Config" e "MB_Buff" contém, respectivamente, as configurações da comunicação Modbus e os registros para transmissão de dados. Todos esses sete datablocks são apresentados respectivamente entre as figuras 78 e 84.

| CalcTemp | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------|
| | Name | Data type | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2 | TempCalculation | Array[0..1] o... | | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | TempCalculation[0] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Soma |
| 4 | TempCalculation[1] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Média |

Figura 78 – Datablock para armazenamento dos resultados dos cálculos com as temperaturas

| Temp | | | | | | | | | |
|------|--------------|------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------|
| | Name | Data type | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2 | Corrigida | Array[0..4] o... | | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | Corrigida[0] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 4 | Corrigida[1] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 5 | Corrigida[2] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 6 | Corrigida[3] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 7 | Corrigida[4] | Real | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 79 – Datablock para armazenamento das temperaturas em graus Celsius

| counters | | | | | | | | | |
|----------|---------|------------------|-----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| | Name | Data type | Start ... | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2 | cont | Array[0..1] o... | | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | cont[0] | Int | 0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Número de ciclos térmicos a realizar |
| 4 | cont[1] | Int | 0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 80 – Datablock para armazenamento dos valores dos contadores do programa

| Timers | | | | | | | | | |
|--------|----------|----|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| | Name | | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 2 | tempo | me | | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | tempo[0] | | T#0ms | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Tempo decorrido do Safety timer |
| 4 | tempo[1] | | T#0ms | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 81 – Datablock para armazenamento dos valores dos temporizadores do programa

Para configurar as entradas e saídas foram definidas tags para cada uma delas, que são apresentadas na figura 85. A saída "CT_ON" indica que o ensaio de ciclos térmicos está em operação, a saída "Out_CT" corresponde ao controle dos sistemas de refrigeração

| Flags | | | | | | | | | |
|-------|------------------|-----------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------|
| | Name | Data type | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | | | | | | |
| 2 | StopCount | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | Liga_CT_IHM | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 4 | Pausa_CT_IHM | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 5 | Lower_Temp_Limit | Real | 35.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 6 | Upper_Temp_Limit | Real | 140.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 7 | Reseta_CT_IHM | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 8 | Out_CT_on | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 9 | Out_CT_off | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 10 | Fim_CT | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 11 | Safety_timer | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 12 | Finalizou_ciclos | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 13 | Subida | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 14 | ResetSubida | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 82 – Datablock para as flags indicativas do programa

| MB_Config | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-----------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------|
| | Name | Data type | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | | | | | | |
| 2 | DISCONNECT | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | READ | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 4 | DATA_ADDR | UDInt | 40004 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 5 | DATA_LEN | UInt | 2 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 6 | DONE | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 7 | ERROR | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 8 | WRITE | Bool | false | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 9 | STATUS | Word | 16#0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 83 – Datablock com os parâmetros de configuração do bloco Modbus

| MB_Buff | | | | | | | | | |
|---------|-------------|----|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Name | et | Start value | Retain | Accessible f... | Writa... | Visible in ... | Setpoint | Comment |
| 1 | Static | | | | | | | | |
| 2 | MB_Data | | | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| 3 | MB_Data[0] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box1 |
| 4 | MB_Data[1] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box2 |
| 5 | MB_Data[2] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box3 |
| 6 | MB_Data[3] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box4 |
| 7 | MB_Data[4] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Box5 |
| 8 | MB_Data[5] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Parar Contagem |
| 9 | MB_Data[6] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recebe SP Min |
| 10 | MB_Data[7] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recebe SP Max |
| 11 | MB_Data[8] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Status |
| 12 | MB_Data[9] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ciclos Restantes |
| 13 | MB_Data[10] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ligado |
| 14 | MB_Data[11] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Envia SP Min |
| 15 | MB_Data[12] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Envia SP Max |
| 16 | MB_Data[13] | | 0.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Teste Resistencia Tensao |

Figura 84 – Datablock com os registros Modbus para comunicação

e indução de corrente e a saída "StartEnabled" corresponde a um indicativo de que o ensaio pode ser iniciado.

Já para as entradas, a "Liga_CT" corresponde a entrada que inicia o ensaio de ciclos térmicos, "Pausa_CT" é uma entrada que quando possui valor lógico 1 finaliza o ciclo em curso, porém não permite o início de novos ciclos até que assumam valor lógico 0, "Reseta_CT" faz com que as condições do ensaio de ciclos térmicos retornem para os valores originais. Por fim, a entrada "Dest_On" é utilizada no ensaio de resistência a tensão, ela

permanece com o valor lógico igual a 1 enquanto a barra sob ensaio permanecer alimentada, esse valor é refletido para o registro modbus correspondente "MB_Data[13]" para o monitoramento via PI.

O CLP foi configurado para permitir a utilização de flags de sistema, o que implica na adição de 5 tags na tabela de tags, que podem ser observados pelos endereços do tipo "%M".

| Default tag table | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|-----------|---------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | Name | Data type | Address | Retain | Acces... | Writa... | Visibl... | Comment |
| 1 | <ni> CT_ON | Bool | %Q0.7 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 2 | <ni> Liga_CT | Bool | %I0.7 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 3 | <ni> Out_CT | Bool | %Q0.6 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 4 | <ni> System_Byte | Byte | %MB1 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 5 | <ni> FirstScan | Bool | %M1.0 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 6 | <ni> DiagStatusUpdate | Bool | %M1.1 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 7 | <ni> AlwaysTRUE | Bool | %M1.2 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 8 | <ni> AlwaysFALSE | Bool | %M1.3 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 9 | <ni> Pausa_CT | Bool | %I0.6 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 10 | <ni> Reseta_CT | Bool | %I0.5 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 11 | <ni> StartEnabled | Bool | %Q0.5 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 12 | <ni> Dest_On | Bool | %I0.1 | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| 13 | <Add new> | | | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

Figura 85 – Tags do CLP: tags de sistema, entradas e saídas

As dashboards IHM não são capazes de exibir diretamente o conteúdo das memórias do CLP, desta forma é necessário criar tags IHM que comuniquem-se com as tags e memórias de interesse do CLP. Por isso foram criadas as tags IHM apresentadas na figura 86, onde "CalcTemp_TempCalculation[1]" corresponde a temperatura média na barra, "counters_cont[0]" a quantidade de ciclos a realizar, "Flags_Liga_CT_IHM", "Flags_Pausa_CT_IHM" e "Flags_Reseta_CT_IHM" correspondem as entradas de Liga, Pausa e Reset, permitindo assim o acionamento do experimento também através da IHM. As flags de "Upper_Temp_Limit" e "Lower_Temp_Limit" possibilitam a visualização e edição dos limites superior e inferior de temperatura dos ciclos térmicos. E finalmente as tags "IHM_CT_ON" e "IHM_Dest_ON" indicam, respectivamente, que o ensaio de ciclos térmicos e resistência a tensão estão operacionais.

Uma única constante "CT_Ciclos" é utilizada, para definir a quantidade de ciclos a ser realizada durante o ensaio.

A.2 Network 1 - Controle do ensaios de ciclos térmicos

No primeiro Scan do programa, o total de ciclos a serem realizados é carregado no contador %DB7 através da constante "CT_Ciclos". É conveniente notar que o primeiro ciclo do ensaio é realizado quando a temperatura da barra está em equilíbrio com a temperatura ambiente, isto implica em um ciclo de aquecimento maior que o convencional,

| IHM Default tag table | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------|------------------|----------|-------------------------|---------|
| | Name ▲ | Data type | Connection | PLC name | PLC tag | Address |
| | CalcTemp_TempCalculation{1} | Real | HMI_Conne... | PLC_1 | CalcTemp.TempCalcu... | |
| | counters_cont{0} | Int | HMI_Connectio... | PLC_1 | counters.cont{0} | |
| | Flags_Liga_CT_IHM | Bool | HMI_Connectio... | PLC_1 | Flags.Liga_CT_IHM | |
| | Flags_Lower_Temp_Llimit | Real | HMI_Connectio... | PLC_1 | Flags.Lower_Temp_Llimit | |
| | Flags_Pausa_CT_IHM | Bool | HMI_Connectio... | PLC_1 | Flags.Pausa_CT_IHM | |
| | Flags_Reseta_CT_IHM | Bool | HMI_Connectio... | PLC_1 | Flags.Reseta_CT_IHM | |
| | Flags_Upper_Temp_Limit | Real | HMI_Connectio... | PLC_1 | Flags.Upper_Temp_Limit | |
| | IHM_CT_ON | Bool | HMI_Connectio... | PLC_1 | CT_ON | |
| | IHM_Dest_ON | Bool | HMI_Connectio... | PLC_1 | Dest_On | |
| | Tag_ScreenNumber | UInt | <Internal tag> | | <Undefined> | |

Figura 86 – Tags IHM: usadas na criação das IHMs desenvolvidas

portanto o primeiro ciclo é descartado e um ciclo a mais é realizado, assim a constante é configurada com 501, uma vez que devem ser realizados 500 ciclos.

Caso o valor tenha sido corretamente carregado a saída indicativa "StartEnabled" estará ativada e portanto o LED aceso, do contrário, é necessário utilizar a chave ou o botão de Reset na IHM.

Com o início habilitado, o usuário pode ligar o ensaio através da chave conectada a entrada "Liga_CT" do CLP ou pelo botão "Iniciar Ensaio" na IHM, então a saída "CT_ON" fica ativa, aciona o LED que indica que o ensaio está em curso e habilita a contagem de ciclos. A saída de controle dos sistemas de refrigeração e indução de corrente é controlada por duas flags que definem se a saída deve receber o comando Set ou Reset, e cada vez que a saída está acionada há um decremento no contador. Quando a contagem termina uma flag desliga a saída "CT_ON" e o experimento chega ao fim.

A.3 Network 2 - Interface entre CLP e PI

Este trecho do programa realiza as manipulações dos registros Modbus com o PI System, com exceção dos registros de temperatura, são três registros em que o PI realiza escrita e seis em que executa leitura e todos estes registros são apresentados na tabela 14. Os registros de 0 a 4, são utilizados para receber respectivamente as temperaturas do box 1 a 5, na network 4.

*Quando o PI identifica através das análises que um erro impede a realização de novos ciclos (desligamento de um disjuntor de proteção da cela, por exemplo), ele envia um sinal para que o CLP interrompa também sua operação.

A.4 Network 3 - Configuração do Modbus do CLP

Este trecho do programa apresenta configuração padrão para permitir a utilização de comunicação Modbus pelo CLP, como "ID modbus" a ser utilizado, direcionamento dos flags de erro e status bem como dos registros de memória a serem utilizados.

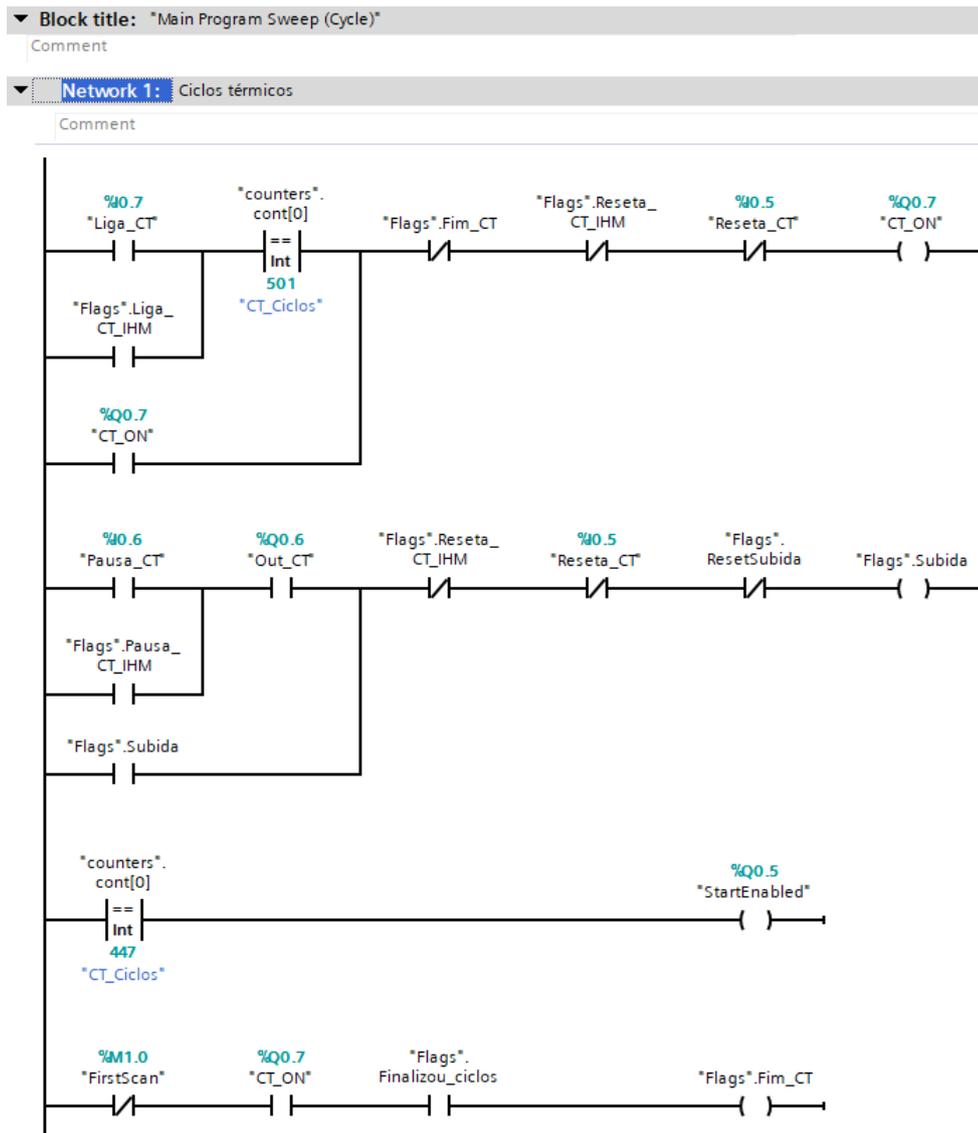


Figura 87 – Rede 1 - desenvolvida para controlar o ensaio de ciclos térmicos

Tabela 14 – Registros Modbus de Interface com o PI e suas finalidades

| Registro | Finalidade |
|----------|--|
| 5 | Recebe sinal de erro do PI System* |
| 6 | Recebe valor de limite inferior de temperatura a partir do PI System |
| 7 | Recebe valor de limite superior de temperatura a partir do PI System |
| 8 | O CLP controla o registro de acordo com a etapa atual de ensaio: 0 - desligado; 1 - Resfriamento; 2 - Aquecimento; 3 - Erro |
| 9 | Atualizado com o valor da contagem de ciclos remanescentes |
| 10 | CLP indica se o ensaio de ciclos térmicos está em curso ou não: 0 - desligado; 1 - ensaio em curso |
| 11 | Atualizado com o valor da flag de limite inferior da temperatura |
| 12 | Atualizado com o valor da flag de limite superior da temperatura |
| 13 | CLP indica se o ensaio de resistência a tensão está em curso ou não: 0 - desligado; 1 - ensaio em curso |

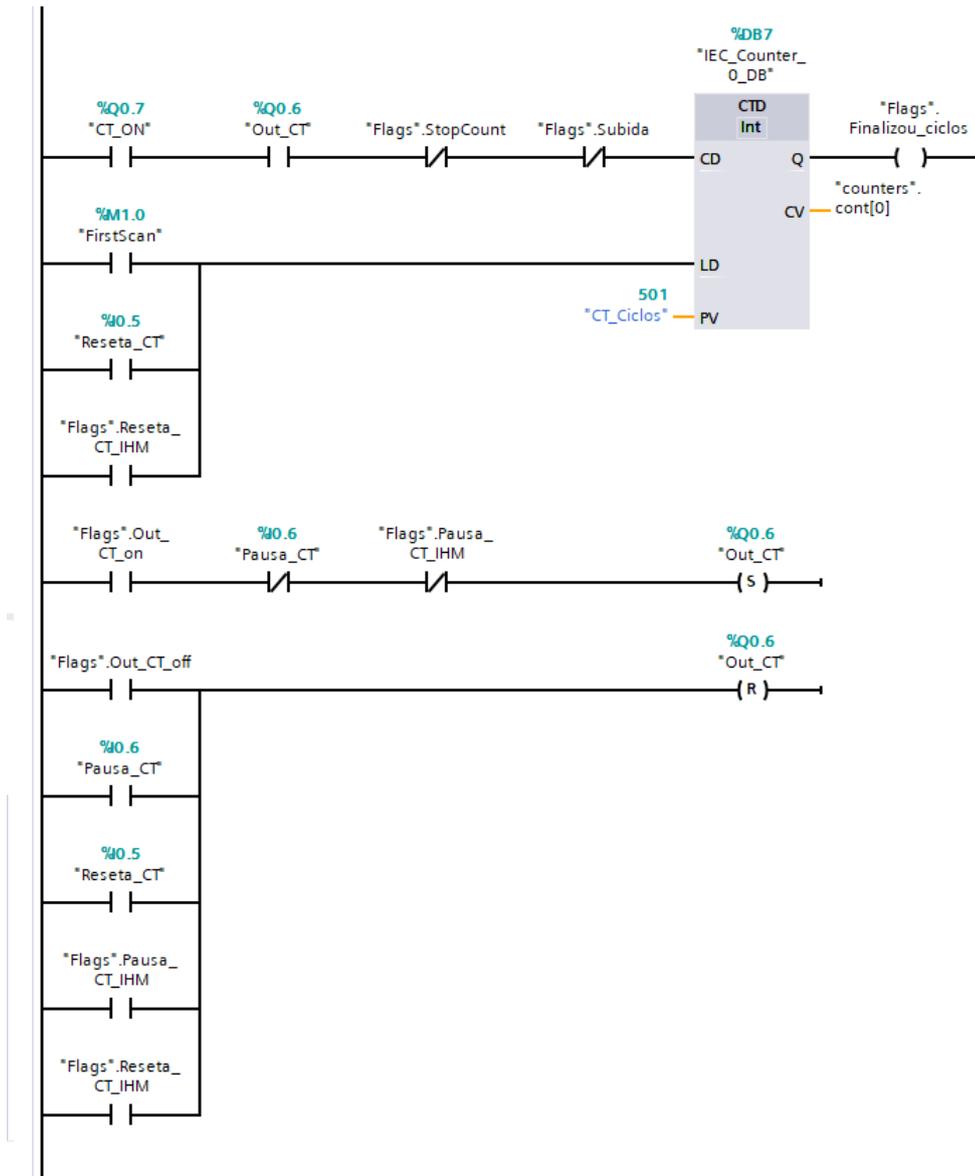


Figura 88 – Continuação da rede 1

A.5 Network 4 - Cálculos envolvendo as temperaturas

Nesta parte do código o valor de temperatura em Kelvins recebido pelo CLP é convertido para graus Celsius se o ensaio de ciclos térmicos estiver em curso e então é calculada a média simples entre as temperaturas, caso a temperatura seja menor que o limite inferior, a flag que controla o Set da saída de controle é acionada, e caso seja maior que o limite superior a flag acionada é a do Reset da saída. Enquanto a temperatura permanece em valores intermediários aos limites, nenhuma das flags é acionada. Daí a importância da utilização de Set e Reset.

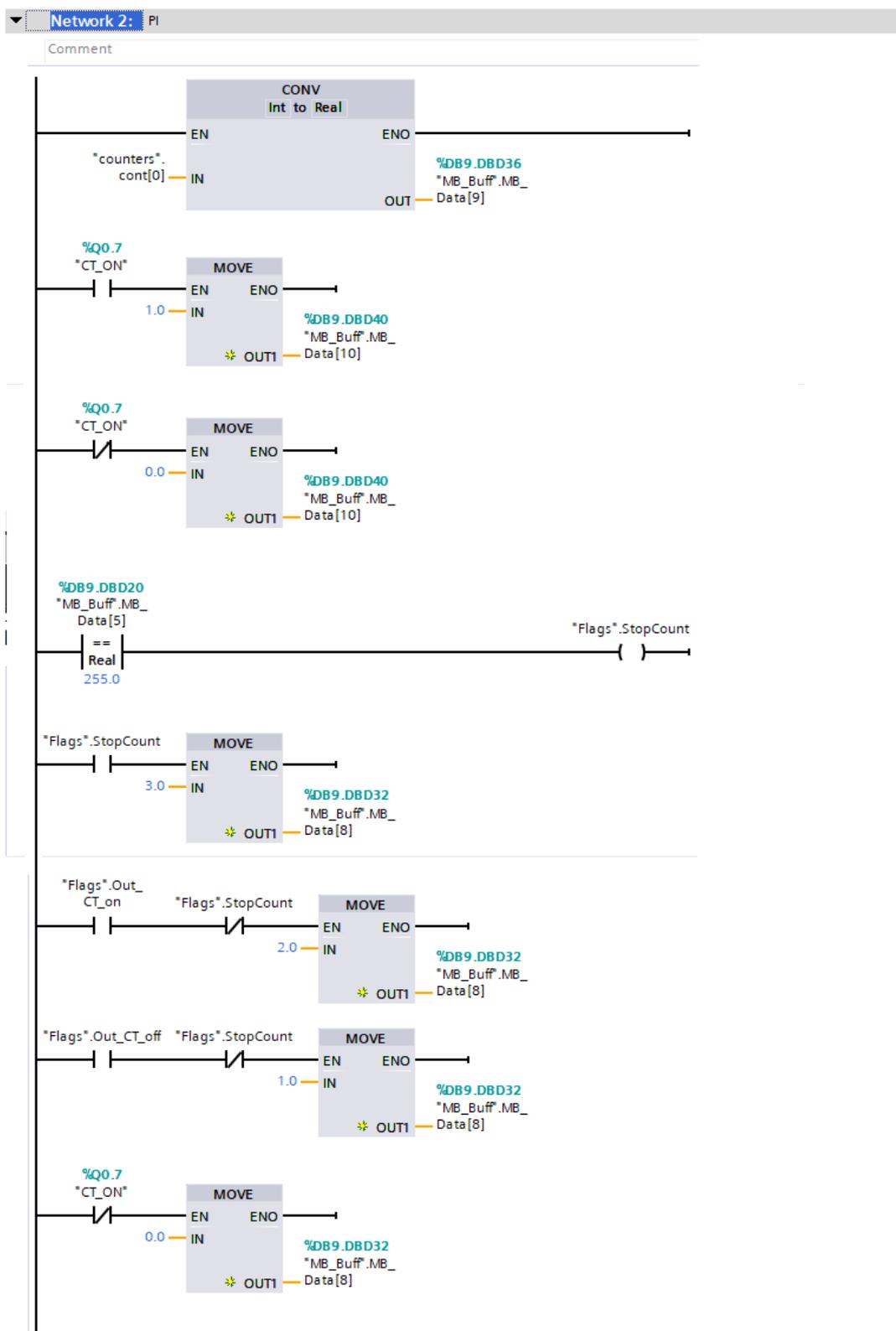


Figura 89 – Rede 2 - controle dos registros de comunicação entre CLP e PI System

A.6 Network 5 - Temporizador de segurança

Para garantir a segurança da operação, em caso de um eventual erro de operação ou comunicação do CLP, um timer de uma hora foi configurado para desligar a saída

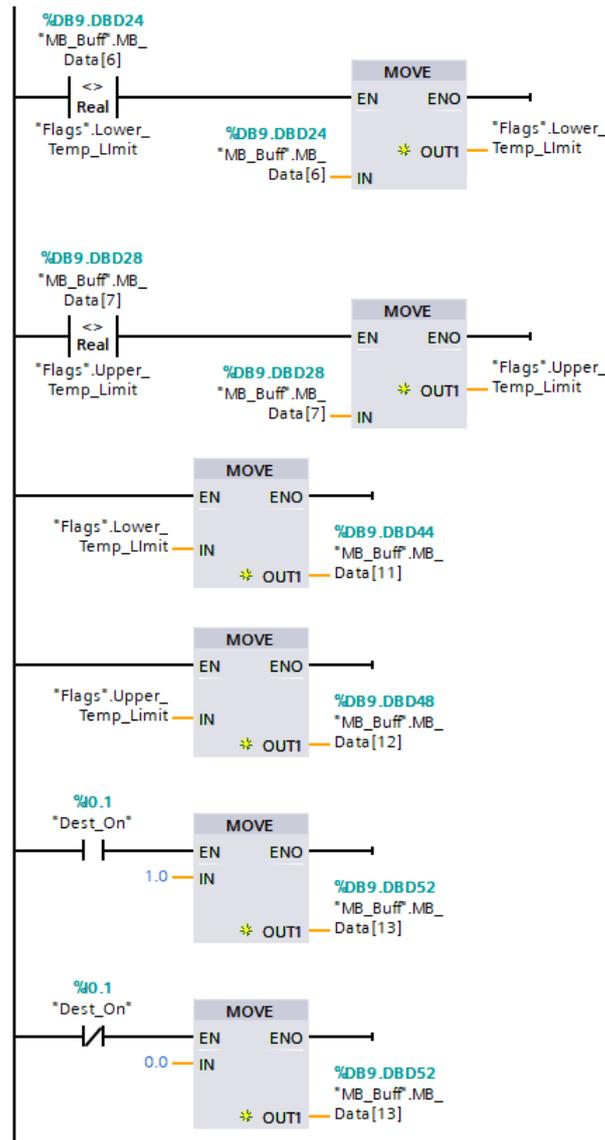


Figura 90 – Continuação da rede 2

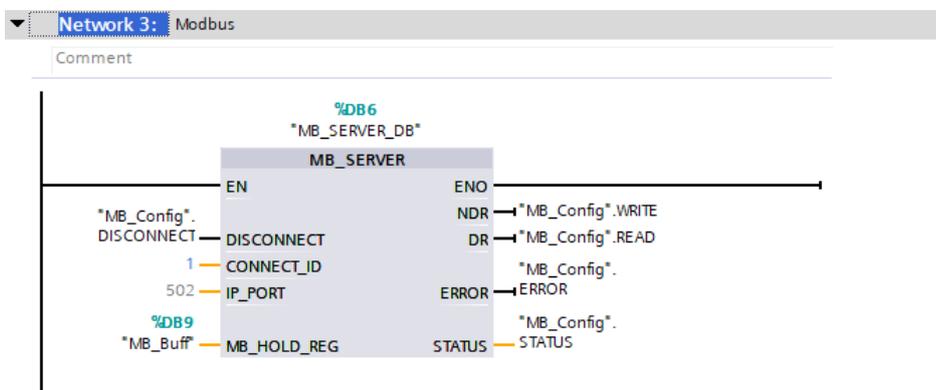


Figura 91 – Rede 3 - Bloco de configuração da comunicação Modbus

de controle caso ele finalize sua contagem, dando início a um ciclo de resfriamento e impedindo assim o aquecimento indeterminado da barra de amostra.

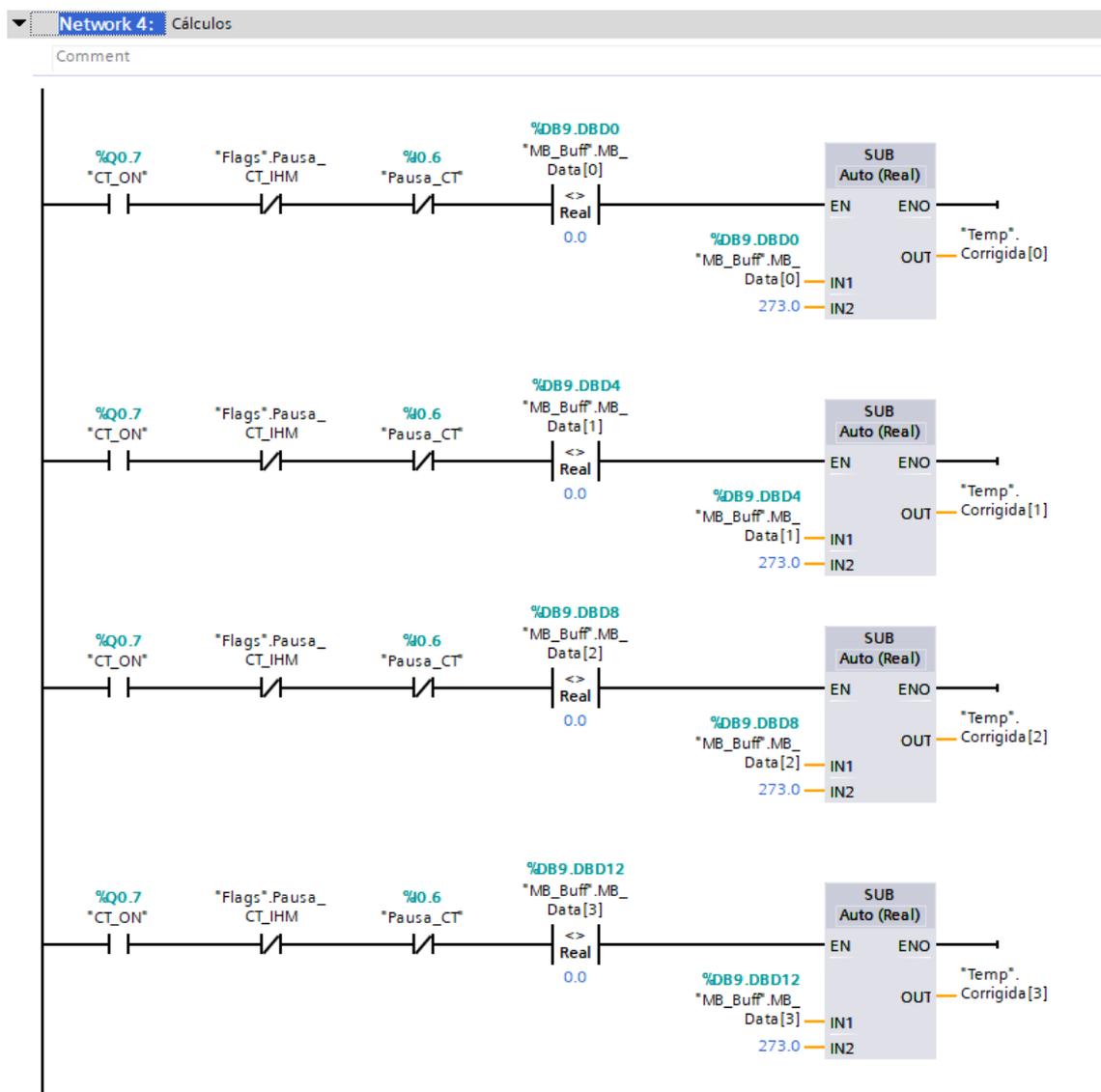


Figura 92 – Rede 4 - Cálculo da temperatura média para controle do ensaio

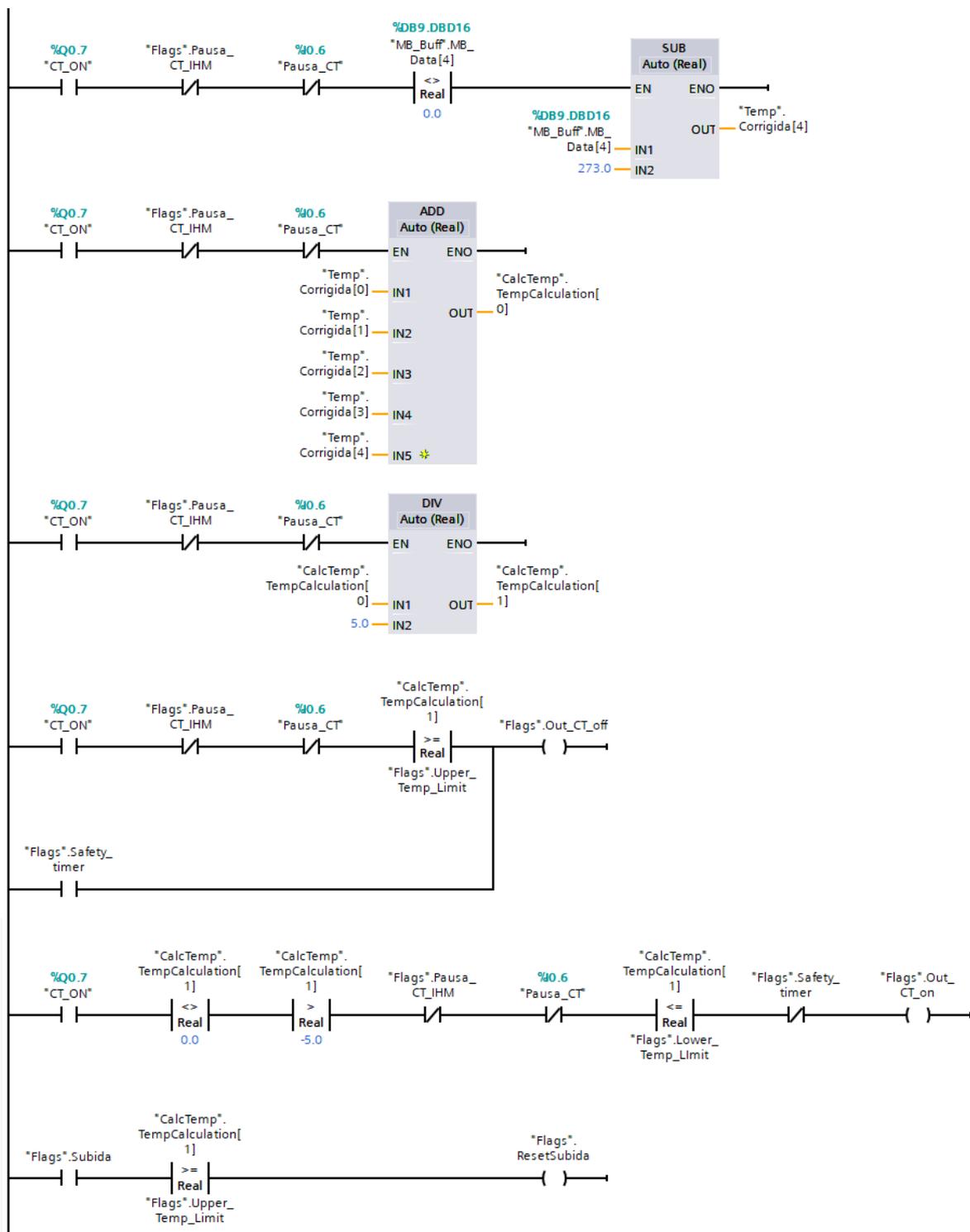


Figura 93 – Continuação da rede 4

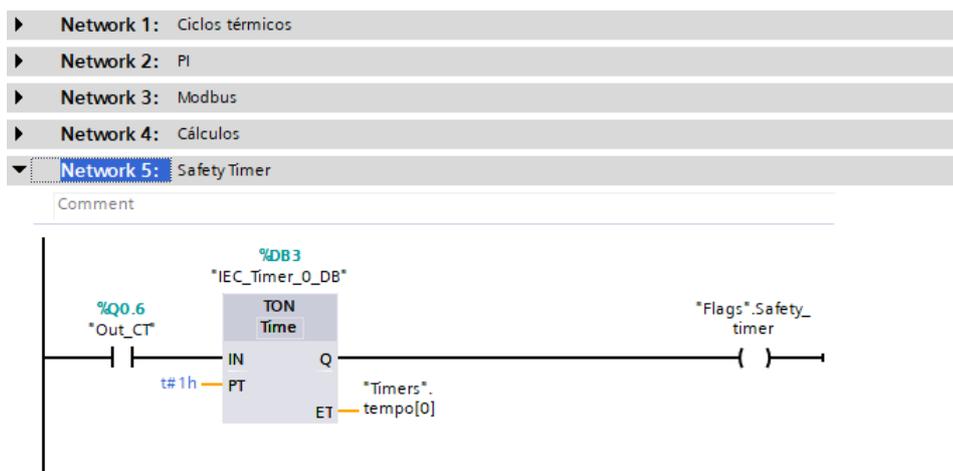


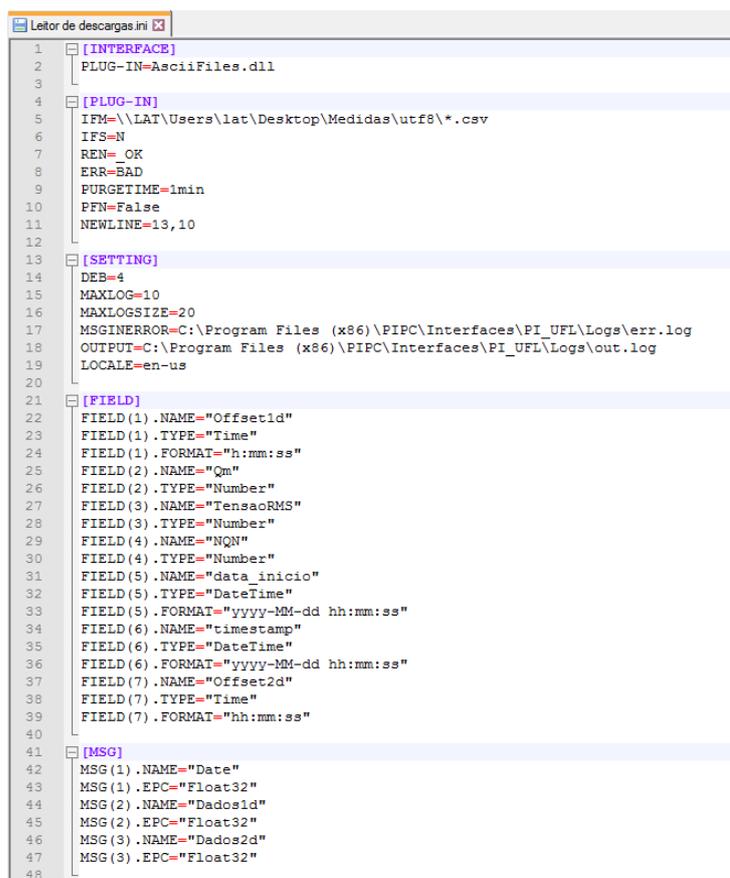
Figura 94 – Rede 5 - Timer de uma hora implementado por razões de segurança

APÊNDICE B – Programas complementares

Esta seção traz programas os complementares desenvolvidos para a operação da bancada. Foi necessário o desenvolvimento do arquivo de configuração ".ini" da interface UFL do PI, e por necessidade de tal interface, um script em PowerShell para a conversão de arquivos codificados em UCS-2 para codificação UTF-8.

B.1 Arquivo de Configuração interface UFL

O arquivo de configuração da interface UFL possui extensão .ini, e indica a interface do PI como identificar as informações a serem extraídas dos relatórios gerados pelo software do medidor de descargas parciais. O arquivo é apresentado nas figuras 95 e 96.



```

1  [INTERFACE]
2  PLUG-IN=AsciiFiles.dll
3
4  [PLUG-IN]
5  IFM=\\LAT\Users\lat\Desktop\Medidas\utf8\*.csv
6  IFS=N
7  REN=_OK
8  ERR=BAD
9  PURGETIME=1min
10 PFN=False
11 NEWLINE=13,10
12
13 [SETTING]
14 DEB=4
15 MAXLOG=10
16 MAXLOGSIZE=20
17 MSGINERROR=C:\Program Files (x86)\PIPC\Interfaces\PI_UFL\Logs\err.log
18 OUTPUT=C:\Program Files (x86)\PIPC\Interfaces\PI_UFL\Logs\out.log
19 LOCALE=en-us
20
21 [FIELD]
22 FIELD(1).NAME="OffsetId"
23 FIELD(1).TYPE="Time"
24 FIELD(1).FORMAT="h:mm:ss"
25 FIELD(2).NAME="Qm"
26 FIELD(2).TYPE="Number"
27 FIELD(3).NAME="TensaoRMS"
28 FIELD(3).TYPE="Number"
29 FIELD(4).NAME="NQN"
30 FIELD(4).TYPE="Number"
31 FIELD(5).NAME="data_inicio"
32 FIELD(5).TYPE="DateTime"
33 FIELD(5).FORMAT="yyyy-MM-dd hh:mm:ss"
34 FIELD(6).NAME="timestamp"
35 FIELD(6).TYPE="DateTime"
36 FIELD(6).FORMAT="yyyy-MM-dd hh:mm:ss"
37 FIELD(7).NAME="Offset2d"
38 FIELD(7).TYPE="Time"
39 FIELD(7).FORMAT="hh:mm:ss"
40
41 [MSG]
42 MSG(1).NAME="Date"
43 MSG(1).EPC="Float32"
44 MSG(2).NAME="Dados1d"
45 MSG(2).EPC="Float32"
46 MSG(3).NAME="Dados2d"
47 MSG(3).EPC="Float32"
48

```

Figura 95 – Primeira parte do arquivo de configuração da Interface UFL

Os blocos "Interface", "Plug-in" e "Setting" contém as informações de configuração sobre o tratamento dos arquivos e os locais de busca por novos arquivos, e onde são

a ser acrescentado ao horário de início do log para gerar o timestamp do PI, e os valores de Qm, Tensão aplicada a barra e NQN. O Comando "StoreInPI" armazena na tag definida entre aspas, o valor da variável da UFL com o timestamp obtido pela soma do offset com o horário de início do log.

Os formatos e posicionamentos foram definidos com base nos arquivos gerados pelo medidor e repetem-se consistentemente, permitindo as configurações realizadas.

B.2 Script PowerShell

Como os arquivos gerados pelo medidor de descargas parciais tem codificação UCS-2 que não é suportada pela interface UFL do PI, foi necessário desenvolver um método para a conversão para o formato UTF-8, utilizando o PowerShell do Windows. O código é apresentado na figura 97.

```

1  ### SET FOLDER TO WATCH + FILES TO WATCH + SUBFOLDERS YES/NO
2  $watcher = New-Object System.IO.FileSystemWatcher
3  $watcher.Path = "C:\Users\lat\Desktop\Medidas"
4  $watcher.Filter = "*.#"
5  $watcher.IncludeSubdirectories = $false
6  $watcher.EnableRaisingEvents = $true
7
8  ### DEFINE ACTIONS AFTER AN EVENT IS DETECTED
9  $action = { $path = $Event.SourceEventArgs.FullPath
10 if ((get-item -path $path) -is [System.IO.DirectoryInfo]){return}
11 $name = $Event.SourceEventArgs.Name
12 $changeType = $Event.SourceEventArgs.ChangeType
13 $saida = "C:\Users\lat\Desktop\Medidas\utf8\${name}"
14 Add-content "C:\Users\lat\Desktop\Medidas\log\log.txt" -value "$(Get-Date), $changeType, $path"
15 get-content -Path $path | out-file $saida -encoding utf8
16 Add-content "C:\Users\lat\Desktop\Medidas\log\log.txt" -value "$(Get-Date), Converted, $saida"
17 Remove-Item -path $path
18 Add-content "C:\Users\lat\Desktop\Medidas\log\log.txt" -value "$(Get-Date), Deleted, $path"
19 }
20 ### DECIDE WHICH EVENTS SHOULD BE WATCHED
21 Register-ObjectEvent $watcher "Changed" -Action $action
22 while ($true) {sleep 5}

```

Figura 97 – Script desenvolvido em PowerShell para conversão de UCS-2 para UTF-8

O primeiro trecho, que vai da linha 2 até a 6 do script, cria um "watcher" que monitora eventos na pasta definida pelo endereço usado. Toda vez que essas mudanças forem identificadas ações serão realizadas de acordo com o tipo de evento que pode ser classificado pelo tipo, como criação, movimentação, modificação, entre outros.

Quando o programa do medidor de descargas faz a exportação do relatório, ele executa esse procedimento em duas etapas: na primeira um arquivo em branco é criado com o nome definido, e no instante seguinte o arquivo é modificado com a inserção dos valores. Desta forma, os eventos que deve ser monitorado e que desencadeará as ações no script, são os eventos de modificação, e são definidos na linha 21.

O trecho entre as linhas 9 e 19 descrevem as ações executadas pelo script quando um evento de modificação é detectado. Cada vez que o evento é identificado o script captura o nome do arquivo UCS-que gerou o evento e cria um arquivo com codificação UTF-8 com mesmo nome na pasta correspondente (definida pelo parâmetro "saída"), copia todo o conteúdo do arquivo original para o novo e deleta o arquivo original após o término da cópia. Um arquivo de log é preenchido durante a execução das três ações do script.

Ao terminar as ações o watcher volta a monitorar a pasta fornecida até a ocorrência de novos eventos.

Anexos

ANEXO A – Artigo submetido

Artigo submetido para o XXII Congresso Brasileiro de Automática CBA a ser realizado em João Pessoa, PB, no mês de Setembro de 2018

TEST BENCH AUTOMATION FOR AGING AND PARTIAL DISCHARGE EXPERIMENTS IN HYDROGENERATOR STATORS

Abstract— This paper proposes the automation of a test bench for partial discharges measurement during thermal cycle tests with nominal voltage applied to hydro generator stator windings, allowing the simulation of simultaneous electrical and thermomechanical stresses. To that end, it is mandatory to identify a relationship between the internal and external winding temperatures since the voltage applied makes it impossible to insert sensors directly to the winding. It proposes the online reading of partial discharge during the entire test; in opposition to the common practice of reading the partial discharge data once before and once after the run of accelerated aging tests, such as the thermal cycle.

Keywords— Hydro generator stator, Partial Discharge test, Concurrent stator stress, Stator life cycle, Test bench automation.

Nomenclature

LAT Laboratório de Alta Tensão (High Voltage Laboratory);
 PoE Power over Ethernet
 PI PI System.
 PI AF PI Asset Framework
 K1 Three Phase contactor for cooling system powering.
 K2 Two Phase contactor for current induction system powering.
 KT Safety timer relay.
 NQN Partial Discharge total activity.
 Qm Magnitude of Partial discharges [pC]
 TC Current Transformer
 V_{rms} RMS voltage applied on the winding.

1 Introduction

Partial discharges are small sparks that happens due to the electrical charges flow when a small gas rupture occurs. They normally occurs in small gaps on the electrical machines insulation when the incident magnetic field gets over the dielectric strength limits of the gas that fills those gaps.

Those discharges are only partial because there is an insulation material with a greater dielectric strength limit in series with the gaps. According to the standard (IEEE Std. 1434, 2000) partial discharges are incomplete electrical discharges between insulations or between insulation and conductor. For power generators, that means that partial discharges can be defined as incomplete electrical discharges that occurs on the interior of stator windings only for generators with 2.3kV (two thousand and three hundred volts) or higher voltage.

The power generator partial discharges usually are intensified by different stresses (electrical, thermal, thermomechanical, amongst others) present on the operation of this kind of equipment (C.Stone, et al., 2014). Hence, the monitoring of partial discharges offers a diagnosis of generator's insulation

condition, and the evolution of partial discharges can show that its insulation is degraded or aged due to the effects of multiple type of stresses present in the operation.

The online monitoring of partial discharges provides results that makes stator windings maintenance and repair activities easier to schedule and also data for the development of mathematical models to predict the remaining lifecycle of generators (Sumereder, 2008) .

According to statistical data, the insulation failures represents the majority of generator failures (Study Committee SC 11, 2003). Several different statistical analysis have been realized with data from generator units in operation leading to the conclusion that the generator lifecycle is directly related to the insulation lifecycle (I. J. Kokko, 2010; C.Stone, et al., 1988; Kelmann & Kaufhold, s.d.; Bartnikas & Morin, 2006).

Realizing aging tests in laboratories simulating the main stresses to machines insulation during the operation is an efficient method to acquire data for the development of mathematical models to predict and access the generator remaining lifecycle.

Electrical, thermal, mechanical and thermomechanical are the main stresses related to electrical machines insulation, but realizing aging experiments with only one kind of those stresses occurring on the winding don't produce the same aging and degradation as the normal operation where all stresses occur simultaneously (Bartnikas & Morin, 2006). Therefore the development of multiple stresses aging experiments are proposed to better simulate what occurs during the electrical machine operation (Bartnikas & Morin, 2006; Morin & Bartnikas, 2012.).

The thermal cycle experiment realized in this work is standardized (IEEE Std. 1310, 2012). The thermomechanical effect that electrical machines are subjected is simulated in a stator winding through the repetition of its heating and cooling cycles, however, differently of what the standard suggests, this experiment was proposed with nominal voltage also applied to the winding. Therefore both electrical and thermomechanical stresses are simultaneously present

on the winding, enabling the monitoring of its partial discharge during the whole experiment.

In relation to the structure of this paper, chapter 2 is about the software and equipment used to collect and manage experiment data. Their configuration are presented in chapter 3. A preliminary experiment is shown in chapter 4, leading to a mathematical relation between internal and external winding temperature. And chapter 5 presents the adjustments made to allow the realization of the thermal cycle with nominal voltage applied experiment and some results obtained at LAT.

2 Instrumentation and data management

To analyze the impact of simultaneous stresses on the winding partial discharges the proposed experiment suggests the online monitoring of those discharges during its realization, therefore several data also must be monitored during its realization:

2.1 Partial discharge and applied voltage

Partial discharges, the main study object of this experiment, are monitored using the partial discharge monitor Haefely Test AG, Model DDX 9121b. This monitor has a coupling capacitor of 1nF, model series 9230 with 100kV maximum voltage and a partial discharge calibrator model 9520, with discharge band from 1pC to 50nC.

Furthermore, the coupling capacitor works as voltage divider and allows the monitor software the capacity of also registering the voltage applied to the winding, besides the partial discharge data.

Figures 1a, 1b and 1c shows the partial discharge monitor, the coupling capacitor and the calibrator, respectively.

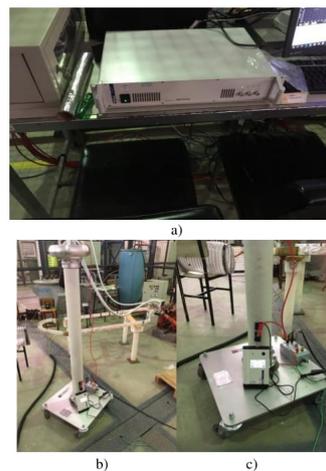


Figure 1. Partial discharges monitor and its components

2.2 Temperature on winding surface

In the thermal cycle experiment, the internal winding temperature must vary between 40°C and 155°C, so it is mandatory to monitor that temperature. However, considering the simultaneous applied voltage it is not feasible to drill the winding to measure the internal temperature, therefore it must be obtained indirectly.

Thus, a FLIR thermal camera model AX8 was used to monitor the temperature in the winding external surface.

Figures 2a e 2b presents the camera and one snapshot taken with it, respectively:

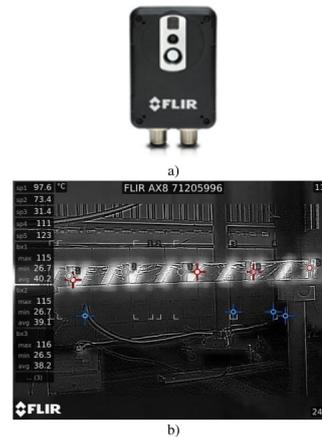


Figure 2. Thermal camera and one of its snapshots

Since the camera can only read the external surface temperature, some experiments were realized without voltage application using a drilled winding that allowed the use of thermocouples to read the internal temperature, in order to obtain a mathematical relation between the internal and external surface temperatures.

2.3 Induced current

To produce the heating of the winding it is necessary to induct a current in it, and it is important to monitor that current in order to assure the heating occurs accordingly to the standard and making adjustments speeding up or down the heating as needed.

Three equipment are used to measure the induced current: a TC 0-2500A:0-5A, a current transducer 0-5A:4-20mA and a Fieldlogger module for data acquisition and registering, presented respectively on figures 3a, 3b and 3c.

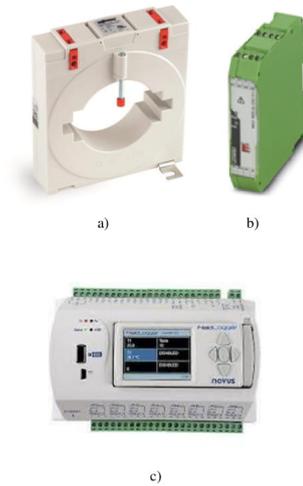


Figure 3. Equipment for measuring and collection of induced current data.

2.4 Environmental condition

In order to observe if environmental conditions effectively affect the winding, environmental temperature, humidity and dew point are monitored using a sensor model T311 from Comet Sensors presented on figure 4.



Figure 4. Sensor T311.

2.5 Communication and data availability

The partial discharge monitor is able to communicate with a computer through its native software that is used to calibrate the monitor (the calibrator induces a known electrical signal and the monitor is then calibrated around that signal), start and finish data collection, monitoring of measured values, and data export to text files with formats such as “.csv”.

Other equipment allows the communication and have their data available through Modbus TCP/IP

protocol. Obs.: the TC and current transducer only realize the induced current from 0-1000A to 4-20mA, send those values to the Fieldlogger which finally makes them available for Modbus reading.

In order to enable the communication via Ethernet TCP / IP, a 24-port PoE switch was installed on the outside bench of the test cell.

2.6 Data storage and management

The PI, a data infrastructure system developed by OSISOFT, is used to store, manage and visualize the data. It centers data from different sources, allowing the association of each monitored variable to elements that makes easier the comprehension of the monitored plant and the visualization of its data.

The PI functioning can be roughly divided in three different levels:

- 1) Interfaces: they read the data from different data sources (usually sensors), associating a timestamp with it and then send them to the server. There are several different interfaces, one for each protocol or type of data source.
- 2) Server: it has two great blocks: PI Data Archive, a temporal database that stores the values (tags) sent by the interfaces and the PI AF that allows the organization of such tags in elements that make it easier for users to view, use and comprehend that data.
- 3) Visualizing tools: they allow the access and visualization of data through different platforms such as MS Excel plug-ins, Web pages, etc.

In this experiment 3 different interfaces were used: PI Interface for Modbus Ethernet ReadOnly, PI Interface for Modbus Ethernet ReadWrite and PI Interface for UFL (interface used to read text files with “.csv” format).

The university works with PI System since 2016 and the PI dedicated infrastructure is located at the university datacenter allowing continuous and reliable data collection.

3 Experiment configuration

To make it possible to perform the experiment, all the equipment and PI interfaces were configured as shown in the following subsections:

3.1 Experiment equipment configuration

Some equipment, other than instrumentation ones, are also used to ensure the proper functioning of the experiments.

In opposition to what standard IEE std 1310 suggests, the thermal cycle experiment will be done with nominal voltage applied to the winding, in order to allow registering the partial discharge evolution during the whole experiment.

The test winding is wrapped with a conductive layer (aluminum foil) all along its rectilinear stretch and connected to the ground point. This way the applied voltage lies between the conductor and the grounded conductive layer that electrically represents the generator stator. The potential difference lies completely in the test winding solid insulation allowing the online monitoring of partial discharges through the coupling capacitor, during the whole experiment.

Another circuit is necessary to apply current to the stator winding. Therefore, a variable autotransformer powering a group of inductors and an isolated cable (where the current is induced) inserted through the inductors were used. The isolated cable is connected to the winding terminals, transmitting the induced current to the winding that heats progressively, enabling the heating cycle to occur.

A cooling system consisting of a wind blower connected to an open flexible folding tube that directs the air pointing it to the winding. This way, whenever the cooling system is on, a great amount of air is directed to the winding, speeding up its cooling cycle.

The thermal cycle is completed after a heating cycle and a cooling cycle are done, and another heating cycle is about to begin.

Figure 5 shows: a winding positioned on four isolating supports, wrapped by a conductive layer; the connection between the winding and the coupling capacitor; the connection between coupling capacitor and partial discharge monitor through a 50Ω coaxial cable; the medium voltage cable with the muffle connected to the industrial frequency voltage source. All these equipment and connections form the voltage applying circuit.

Figure 6 shows the circuit that induces the current for the winding: a cable with XLPE insulation for current induction; four current inductors connected in parallel configuration, and a variable autotransformer (VARIAC) with industrial frequency and adjustable voltage between 0 and 240V.

Then, figure 7 shows the cooling system composed by the wind blower that uses a Three phase induction motor with 0,75 HP and the open flexible folding tube that directs the air to the winding as can be seen on figure 5.



Figure 5. Voltage applying circuit



Figure 6. Current induction circuit



Figure 7. Cooling system

In order to monitor the temperature and accordingly control the current induction circuit and the cooling system, the Exsto module XT136 was used. Figure 8 shows the module and the connections used on the experiment.



Figure 8. PLC module for controlling the experiment.

This module counts with PLC Siemens S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC), 8DI/8DO expansion card, 5-port Ethernet switch, HMI KTP700 basic and several connectors, switches and LEDs for ease of access and integration.

The PLC programming was done using ladder logic. The software communicates with the Fieldlogger or PI through Modbus Ethernet to acquire the temperature readings, calculates the average and when that average reaches the limits upper or lower, it activates the correspondent system: the cooling system when it reaches the upper limit, and the current induction circuit when it reaches the lower limit.

An HMI interface was developed for experiment operation and it is shown on figure 9.



Figure 9. HMI interface screen.

Since the PLC must command the power of inductors or the cooling system accordingly to the temperature, a digital out was used. However, the PLC digital out can provide 24Vdc and the inductors must be powered with 220Vac (for the current induction circuit) or 380Vac (for the cooling system). Therefore, it was necessary to design a drive circuit with contactors and timer relay, shown on figure 10.

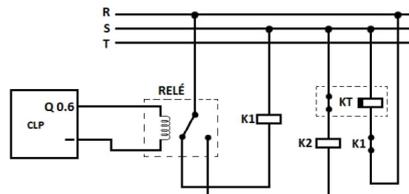


Figure 10. Drive Circuit - Command

The PLC digital out was connected to a 24Vdc relay coil, capable of driving up to 250Vac. The relay normally closed contact was connected to the coil of K1, its normally open contact was connected to the coil of K2 and finally the relay common contact was connected to a phase (R). The normally closed contact of KT was connected to the second coil terminal of K2, no connection was made using its normally open contact, and its common contact was connected to a different phase (S). A normally close contact of K1 was connected to a phase (R) and to KT's coil. The remaining contacts of coils K1 and KT were connected to a different phase (S). Finally, the normally open contacts from K1 and K2 were respectively connected to the cooling system and current induction circuit, and corresponding phases as shown in figure 11.

In this configuration, when the PLC out is off (logic value 0) the cooling system is active. When the PLC out is on (logic value 1) the K1 coil has its power cut. KT is powered (KT is configured to 1h period, and works as a safety timer for the heating cycle interrupting the circuit after one hour in case the system loses the command signal). In addition, so is K2 coil, powering the inductors and keeping them on, until the upper temperature limit is reached or the heat safety timer ends.

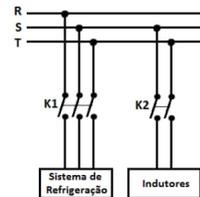


Figure 11. Drive circuit – Actuators powering

3.2 Data acquisition and storage configuration with PI

As mentioned before, the PI collects and centers the data from different instrumentation equipment using proper interfaces according to the data source protocols.

In this project, the partial discharge monitor software makes its data available through “.csv” format text files with UCS-2 coding, through export request made by the user. Therefore, a mouse macro software was used to start the monitor software, recall the last calibration, start the data acquisition, wait thirty minutes, end the data acquisition, save the test and export the “.csv” report file. Such sequence of actions is repeated forty eight times adding to twenty-four hours of operation. Some user ought to start the macro every twenty-four hours in order to collect all the experiment data.

The PI interface for UFL is only able to read files with UTF-8 coding, therefore, a PowerShell script was developed. The script monitors the folder where the “.csv” files are exported, and every time an UCS-2 file is created, its content is copied to a new corresponding UTF-8 file. After the copy, the UCS-2 file is deleted and the UTF-8 file can be read by the PI interface for UFL.

In order to configure the UFL interface, a configuration file is created containing the folder path to the files to be read, its nomenclature standards, the format and location of the information that must be extracted, and also which tags must be updated with the extracted values.

For the partial discharges monitor the relevant information are: 1) The data capture start date – which identification occurs searching the character “-” in specified positions on the lines of the file. 2) The time offset between the reading and the data acquisition start. 3) The value Q(peak) [pC] – equivalent to Qm. 4) The RMS voltage applied to the winding. 5) The discharge pulses rate – equivalent to NQN. The identification of all items, except for item 1, is done using the file indentation.

After extracting the values, the writing of the tags Qm, TensãoRMS and NQN is done using the values for those data in addition to the timestamp that is a composition between the data acquisition start date and the reading time offset from the start.

Once the file is totally read, the interface changes the file name so it doesn't read the same file twice, and after some while it deletes old files that have already been read.

In relation to the other equipment, the Modbus interfaces (two Modbus Ethernet interfaces are used: ReadOnly – that only reads data from equipment; and ReadWrite – that writes data in specific PLC registers) are configured using the IP addresses of those that must be read, the ports used in communication (Modbus usually uses port 502). Besides that, it is also necessary to configure the interface to operate as a Windows service and create scan classes – that determines the time interval between readings of the data source for all tags configured for such scan class.

Table 1 presents the IP address of each equipment and the number of tags created for each one of them.

Table 1. Equipment IP addresses and tag number

| Equipment | IP address | Tags |
|----------------------------|----------------|------|
| Partial discharges Monitor | 200.235.76.123 | 03 |
| Thermal Camera | 200.235.77.70 | 21 |
| T3511 Sensor | 200.235.77.74 | 03 |
| Fieldlogger | 200.235.77.76 | 12 |
| PLC | 200.235.77.79 | 05 |
| Network Switch | 200.235.77.80 | - |

In order to configure the tags in the PI, the PI System Management Tools (PI SMT) software is used. It is necessary to identify the interface used and its instance using the fields "Point Source" and "Location1". Specify the source equipment Modbus ID with field "Location2". Define the Modbus function and the data type to be read at "Location3". Choose the scan class on "Location4". Provide the Modbus register equipment address corresponding to the data to be read through "Location5". Finally, the equipment IP address is set on field "Instrument Tag".

With the correct configuration of the interface and the tags, the Modbus interface will be able to collect, format and send the data to the PI server, allowing the monitoring of the data during the experiment, as well as the visualization and analysis of the data in posterior phases of the project.

Obs.: More details about the interfaces Modbus, its configuration and its tags can be found in (OSISOFT, 2016).

4 Preliminary experiments and its results.

In order to verify the existence of a mathematical relation between the internal and external surface of the winding insulation, it was proposed the realization of preliminary experiments. These experiments would be done using a winding to be discarded, with no voltage applied, so it could be drilled, allowing the use of thermocouples to acquire its internal temperature and its comparison with the external surface temperature obtained by the thermal camera.

The thermal camera requires points over surfaces with high emissivity in order to realize correct readings of the temperature on that surface. Therefore, five points were chosen along the side of the winding monitored by the camera, such points were wrapped with insulating tape (it has emissivity index close to 1). Using the camera web interface five monitoring boxes were created, each one containing only one of the points wrapped with insulating tape. The camera provides readings of the maximum, minimum and average temperatures read on the box area.

In order to the thermocouples readings be as close as possible to the readings done by the camera the drillings for its installation were done in the points covered with insulating tape.

To read the data from the thermocouples, each one of them were connected to five different analog inputs of the Fieldlogger configured as Thermocouple K. The current transducer was also connected to a Fieldlogger analog input, configured as 4-20mA current input. The camera readings were always available through Modbus TCP/IP and the use of the Fieldlogger made the thermocouples and current transducer readings available through Modbus too.

All the readings were sent and stored on the PI server. Furthermore, the PLC was programmed to read the temperatures of each thermocouple and use it to control the experiment as explained on session 3.1 of this paper.

The induced current was set to 600A and some heating and natural cooling (without the use of the cooling system) cycles were realized. It can be noted on figure 12 that the cycle times were very different for the heating and cooling cycles. The experiment standard says that the heating and cooling cycle times must be close from one another and they have a temperature variation rate between 1,5°C and 3,5°C per minute. Hence it was decided the use of the cooling system to accelerate the cooling cycle and the reduction of the induced current to deaccelerate the heating time in order to meet the standard requirements.

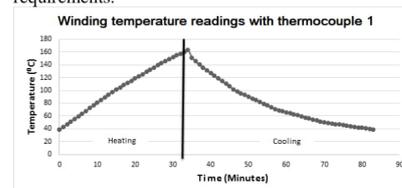


Figure 12. Thermocouple 1 readings for 1 thermal cycle.

After the heating and cooling times were adjusted, several cycles were realized, in order to analyze the variation of the temperature behavior during the experiment.

Considering that the distance between the different reading points is small (around 30cm) concerning heat propagation, a uniform variation of the temperature in those five points is expected. That can be verified by the graphs on figures 13 and 14.

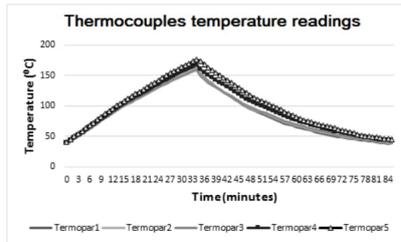


Figure 13. One thermal cycle reading by all thermocouples.

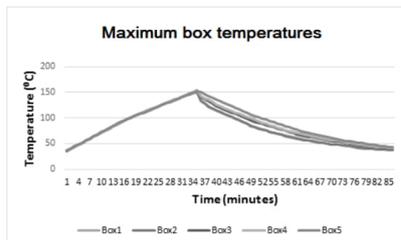


Figure 14. Maximum temperatures at the five monitored boxes during a thermal cycle.

Therefore, it was chosen the use of the average thermocouple temperature and the average of the boxes maximum temperatures. Figure 15 presents a graphical comparison of those averages, as well as the difference between them (delta), and it is possible to observe that the delta varies a lot according to the temperature, but has small variation between different thermal cycles.

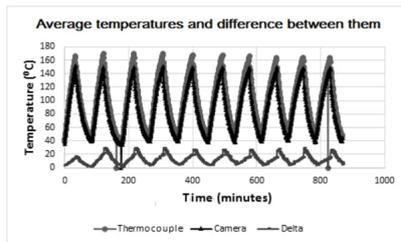


Figure 15. Comparison between average temperatures obtained

With the data of several thermal cycles, it is possible to identify the time where the heating and cooling cycles ended and then compare the maximum and minimum temperatures obtained by the camera and thermocouples, and the difference between them on those points. This information allows the identification of surface temperatures corresponding to internal temperatures of 40°C and 155°C. Tables 2 and 3 compare the internal temperatures (thermocouple) and at external surface (camera), as well as the difference between them (delta) at the cycle end times for heating and cooling.

Table 2. Cooling cycle end times

| Cooling | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cycle end Time | Thermocouple | Camera | Delta |
| 16-feb-18 11:10:17 | 42,68982 | 39,79946 | 2,890359 |
| 16-feb-18 12:38:00 | 43,8972 | 38,34757 | 5,549628 |
| 16-feb-18 14:11:13 | 42,79444 | 39,23395 | 3,56049 |
| 16-feb-18 15:40:09 | 44,74939 | 39,38378 | 5,36561 |
| 16-feb-18 17:14:13 | 43,06484 | 38,81601 | 4,248834 |
| 16-feb-18 18:38:10 | 47,54771 | 41,24996 | 6,29775 |
| 16-feb-18 20:02:00 | 44,81488 | 39,02382 | 5,791061 |
| 16-feb-18 21:24:14 | 46,44759 | 41,13007 | 5,317521 |
| 16-feb-18 22:49:46 | 44,29579 | 40,54376 | 3,752026 |
| 17-feb-18 00:12:00 | 46,09599 | 39,43432 | 6,661666 |
| Average | 44,63976 | 39,69627 | 4,943495 |

It is possible to see that the average temperature at the end of the cycle presented only 5°C to the 40°C target, the delta also presented a 5°C variation. Therefore, to achieve the internal 40°C target, it is necessary that the surface temperature readings are equal to 35°C.

Table 3. Heating cycle end times

| Heating | | | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cycle end time | Thermocouple | Camera | Delta |
| 16-feb-18 10:15:10 | 155,141 | 141,7434 | 13,39763 |
| 16-feb-18 11:41:25 | 155,0252 | 136,0973 | 18,92789 |
| 16-feb-18 13:16:30 | 155,2739 | 138,0295 | 17,2444 |
| 16-feb-18 14:44:53 | 155,0615 | 138,0957 | 16,96576 |
| 16-feb-18 16:18:18 | 155,4462 | 137,7332 | 17,71306 |
| 16-feb-18 17:51:05 | 154,8871 | 139,706 | 15,18109 |
| 16-feb-18 19:17:00 | 155,4285 | 140,3953 | 15,03315 |
| 16-feb-18 20:43:26 | 155,4088 | 140,8044 | 14,6044 |
| 16-feb-18 22:05:01 | 155,4391 | 141,1161 | 14,323 |
| 16-feb-18 23:29:30 | 154,8928 | 142,1631 | 12,72967 |
| Average | 155,2004 | 139,5884 | 15,61201 |

Considering the heating cycles, the error to the target was always around only 0,5°C, therefore, to find the external surface corresponding to the internal temperature of 155°C, it is enough to use only the delta (around 15°C).

This way it is possible to use external surface temperatures of 35°C and 140°C as equivalents to internal temperatures of 40°C and 155°C, respectively. Therefore, these must be the lower and upper limits of operation on the experiment with applied voltage.

5 Thermal cycle with nominal voltage applied experiment

Since in the applied voltage experiment the temperature can only be read on the external surface using the camera, the relation obtained on section 4 is used to infer the internal temperature.

This way the PLC will need the temperatures read by the camera to control the experiment, however, the Modbus address mapping of AX8 cameras is done with 6 digit addresses, making the direct communication between PLC and camera impossible. A PI interface for Modbus Ethernet ReadWrite was used as solution, it will write the maximum box readings in five PLC registers (one for each camera box), every time the PI receive a new value for the tags monitoring the boxes.

With all adjustments done it is possible to realize the thermal cycles with applied voltage experiment monitoring the partial discharge.

Currently an experiment is being realized and the figure 16 presents a part of the results relating the temperature on the external surface with the partial discharge magnitude.

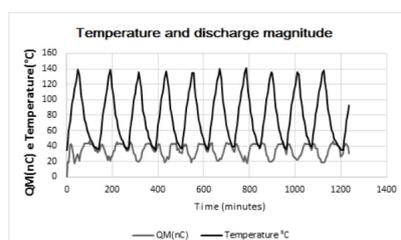


Figure 16. External surface temperature and partial discharge magnitude.

6 Conclusion and future work

With all equipment and software properly installed and configured, it was possible to realize preliminary experiments and verify that there is a relation between the external surface and internal temperatures during the thermal cycle (the difference starts at 5°C when the internal temperature is 40°C and it steadily grows up to 15°C when the internal temperature is around 155°C).

Such relation allows the realization of thermal cycle with applied voltage experiments as proposed. The test bench works properly in an automated way, allowing the online and remote monitoring of the experiment using the PI System.

Next work consists in the development of notification systems through e-mail or cell phones messages to inform the operation status of the test bench and also the analysis of the obtained data with the progressive aging of the winding.

Acknowledgments

The authors are grateful to CEMIG for the partnership and all the support on the project "Proposal for an Approach to Diagnosis and Evaluation of Generators' Life", which this work is part of, as well as OSISOFT for the partnership and support in the issues related to the PI System.

References

- Bartnikas, R., & Morin, R. (2006). Analysis of multistress-accelerated aged stator bars using a three-phase test arrangement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- C.Stone, G., Culbert, I., A.Boulter, E., Dhirani, H., & C.Stone, G. (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines*. New Jersey: IEEE PRESS.
- C.Stone, G., Lloyd, B., Sedding, H., & Gupta, B. (1988). The Ability of Diagnostic Tests to Estimate The Remaining Life Time of Stator Winding Insulation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- I. J. Kokko, V. (2010). Electrical Ageing in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings. *XIX International Conference on Electrical Machines*.
- IEEE Std. 1310. (2012). *IEEE Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Rotating Machine*. New York: IEEE Power and Energy Society.
- IEEE Std. 1434. (2000). *IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*. New York: IEEE Power Engineering Society.
- Kelmann, F., & Kaufhold, M. (s.d.). *Evaluation Analysis of Thermal Ageing in Insulation Systems of Electrical Machines - A Historical Review*. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2010.
- Morin, R., & Bartnikas, R. (2012.). *Multistress Aging of Stator Bars in a Three-Phase Model Stator Under Load Cycling*. *IEEE Transaction on Energy Conversion*.
- OSISOFT. (2016). *PI Interface for Modbus Ethernet PLC 4.2*. San Leandro: OSISOFT.
- Study Committee SC 11, E. (2003). *Hydrogenerator Failures - Results of the Survey*. CIGRE.
- Sumereder, C. (2008). *Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis*. *EEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.

Referências

- ABNT. Tb-23/91 lighting terminology. 2016. 12, 22
- BARTNIKAS, R.; MORIN, R. Analysis of multistress-accelerated aged stator bars using a three-phase test arrangement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 162–170, 2006. 16, 17
- BOGGS, S. A. Partial discharge: overview and signal generation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 6, n. 4, p. 33–39, 1990. 20
- BRAGA, N. C. *Filtragem e Ripple (ART1204)*. 2018. <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5389>>. 40
- CARMELITO, B. E. Sistema integrado de gestão energética do campus José Rodrigues Seabra. 2017. 24, 27
- CARVALHO, F. B. d. et al. Sistemas PIMS - conceituação, usos e benefícios. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 1, n. 4, p. 1, 2005. 27
- CHRZANOWSKI, K. Non-contact thermometry: measurement errors. *Research and Development Treaties Vol 7, Warsaw*, SPIE Polish Chapter, 2001. 22
- CIGRE. CIGRE Study Committee SC11: Hydrogenerator failures – Results of the survey. EG11.02, 2003. 16
- DUTERTRE, B. Formal modeling and analysis of the modbus protocol. In: SPRINGER. *International Conference on Critical Infrastructure Protection*. [S.l.], 2007. p. 189–204. 25
- EPPERLY, R. A.; HEBERLEIN, G. E.; EADS, L. G. A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography. In: IEEE. *Petroleum and Chemical Industry Conference, 1997. Record of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 44th Annual*. [S.l.], 1997. p. 59–68. 23
- FLIR. User's manual - FLIR AX series. 2016. 12, 22, 44, 45
- ISA. Enterprise-control system integration part 1: Models and terminology. 2010. 8, 28
- KIELMANN, F.; KAUFHOLD, M. Evaluation analysis of thermal ageing in insulation systems of electrical machines—a historical review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 17, n. 5, 2010. 16
- KOKKO, V. I. Electrical ageing in lifetime estimation of hydroelectric generator stator windings. In: IEEE. *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference On*. [S.l.], 2010. p. 1–5. 16
- KURTZ, M.; LYLES, J.; STONE, G. Application of partial discharge testing to hydro generator maintenance. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 8, p. 2148–2157, 1984. 20

- MADDING, R. P. Thermographer-friendly equipment design for predictive maintenance: baseline thermograms, thermal modeling, and emissivity. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Thermosense XXI*. [S.l.], 1999. v. 3700, p. 2–6. 23
- MALDAGUE, X.; MOORE, P. O. *Nondestructive testing handbook: infrared and thermal testing*. [S.l.]: American society for nondestructive testing, 2001. 22
- MORIN, R.; BARTNIKAS, R. Multistress aging of stator bars in a three-phase model stator under load cycling conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 374–381, 2012. 17
- ORGANIZATION, M. *MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3*. 2018. <http://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf>. 8, 12, 25, 26, 27
- OSISOFT. Historian. 2016. 8, 29, 30
- SANTOS, L.; BORTONI, E. d. C.; BASTOS, G. S. Termografia infravermelha. FUPAI - Fundação de Pesquisa e Assessoramento à indústria, 2017. 22, 23
- SAUTER, T.; LOBASHOV, M. End-to-end communication architecture for smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 58, n. 4, p. 1218–1228, 2011. 12, 24, 25
- STONE, G. et al. The ability of diagnostic tests to estimate the remaining life of stator insulation. *IEEE transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 833–841, 1988. 16, 20, 21
- STONE, G. C. et al. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. v. 21. 16
- STONE, G. C.; WARREN, V. Effect of manufacturer, winding age and insulation type on stator winding partial discharge levels. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 20, n. 5, p. 13–17, 2004. 20, 21
- SUMEREDER, C. Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 15, n. 3, 2008. 16
- WARREN, V. Partial discharge testing—a progress report. In: *Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1–13. 20, 21
- WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 17–27, 2017. 24